

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ALGORITMO HÍBRIDO APLICADO AO  
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE REDES AÉREAS  
DE MÉDIA TENSÃO**

MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ CUNO

FOZ DO IGUAÇU

2016



Miguel Angel Sánchez Cuno

**ALGORITMO HÍBRIDO APLICADO AO PLANEJAMENTO DA  
EXPANSÃO DE REDES AÉREAS DE MÉDIA TENSÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Foz do Iguaçu

2016



# **ALGORITMO HÍBRIDO APLICADO AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE REDES AÉREAS DE MÉDIA TENSÃO**

Miguel Angel Sánchez Cuno

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:  
Data da defesa pública: 09/08/2016

---

Prof. Dr. **Carlos Roberto Mendonça da Rocha** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

---

Prof. Dr. **Ricardo Luiz Barros de Freitas**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

---

Prof. Dr. **Rubén Augusto Romero Lázaro**  
Universidade Estadual Paulista – UNESP



# Resumo

Neste trabalho é apresentado um Algoritmo Híbrido para resolver o problema de Planejamento da Expansão de Redes Aéreas de Média Tensão. O Algoritmo Híbrido utiliza duas estratégias para resolver o problema. A primeira utiliza um Algoritmo Heurístico Construtivo que procura trabalhar com parâmetros ao invés de trabalhar com variáveis, com o objetivo de reduzir o tempo de convergência do processo de busca procurando não prejudicar a qualidade da solução. A segunda estratégia é baseada em um Algoritmo do tipo Branch and Bound, que utiliza a solução do problema obtida durante a execução da primeira estratégia como um ponto de partida. Assim, esta solução é usada como incumbente neste segundo processo. Neste contexto, o Algoritmo Híbrido desenvolvido e implementado neste trabalho, aproveita a vantagem de reduzir o tempo de convergência do Algoritmo Heurístico Construtivo e a vantagem de garantir que a solução seja a de melhor qualidade, que são as soluções produzidas por algoritmos do tipo Branch and Bound. O Algoritmo foi testado em três sistemas testes, sendo estabelecido um plano para a expansão de redes aéreas de média tensão para cada sistema.

**Palavras-chave:** Algoritmo Híbrido; Planejamento de Sistemas de Distribuição; Algoritmo Heurístico Construtivo; Algoritmo Branch and Bound.

# Abstract

This work presents the development of a Hybrid Algorithm to solve the problem of Planning the Expansion of Medium Voltage Overhead Networks. The Hybrid Algorithm uses two strategies to solve the problem. First uses a Constructive Heuristic Algorithm that tries to work with parameters instead of working with variables, with the objective of reducing the convergence time to the research process trying not to impair the quality of the solution. The second strategy is based in a Branch and Bound Algorithm, that uses the solution of the problem obtained as a starting point while the first strategy is running. Thus, this solution is used like incumbent in the second process. In this context the hybrid algorithm developed and implemented in this work, takes advantage of reducing the convergence time of the Constructive Heuristic Algorithm and the advantage of guarantee that the solution has the best quality, which are the solutions produced by algorithms type Branch and Bound. The Algorithm has been tested in three test systems, being established a plan to expand overhead medium voltage networks for each system.

**Keywords:** Hybrid Algorithm; Distribution System Planning; Constructive Heuristic Algorithm; Branch and Bound Algorithm.

Dedico este trabalho aos meus Pais  
Ao meu irmão  
Às minhas irmãs

“Sucesso não é o final, fracasso não é fatal: É a coragem para continuar que conta”  
“El éxito no es definitivo, el fracaso no es fatídico. Lo que cuenta es el valor para continuar”

Winston Churchill



# Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus por me-brindar a fortaleza que eu precisava nos momentos de fraqueza e iluminar meu caminho para assim conseguir chegar até o final desse mestrado.

Agradeço aos meus pais Juana (Q.E.P.D.) e Alfredo (Q.E.P.D.), pela formação pessoal e os bons valores que eles me ensinaram desde que eu era criança, e mesmo que eu não soube aproveitar tudo, simplesmente à lembrança deles foi o motivo para não me render e lutar até o final deste caminho, porque eu tenho a certeza que eles estiveram sempre ao meu lado.

Ao meu irmão Jimmy e as minhas irmãs Jéssica e Gianella por estar sempre comigo, mesmo que eles estiveram longe, sempre me fizeram sentir sua presença e apoio incondicional nos momentos que eu mais precisava. A toda minha família em geral (tios e primos), que sempre me brindaram o seu apoio.

À Verónica Q.A. pelo seu apoio, afeto e carinho incondicional que me fez sentir desde que ela apareceu novamente na minha vida. Apesar dos problemas e as coisas que eu fiz errado, ela foi minha motivação e minha razão para me esforçar e lutar ao longo desse caminho.

Ao professor Dr. Rubén A. Romero Lázaro pela sua grande ajuda desde que eu cheguei ao Brasil e pela oportunidade para continuar com o mestrado.

À senhora Lucila Reynoso por seu grande apoio e recomendações que me ajudaram muito desde que eu cheguei ao Brasil.

Ao professor Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha pela sua orientação, sugestões e ideias que me ajudaram para a realização deste trabalho, além das oportunidades para continuar e acabar com o mestrado.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação – PGEEC pelos conselhos, ensinamentos e oportunidades que me brindaram nas matérias desenvolvidas no mestrado.

A todos os meus amigos da Turma 2014 do programa de PGEEC pelo apoio e companheirismo.

Finalmente agradeço a Fundação Parque Tecnológico Itaipu – FPTI, pelo apoio financeiro recebido durante a realização do mestrado.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Capítulo 1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O Problema .....	3
1.2 Objetivos .....	5
1.2.1 Objetivo Geral .....	5
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
1.3 Justificativa .....	5
1.4 Estrutura do Trabalho .....	6
<b>Capítulo 2 Algoritmos Heurísticos</b>	<b>9</b>
2.1 Introdução .....	9
2.2 Algoritmo Heurístico Construtivo .....	11
2.3 Revisão Bibliográfica .....	12
2.4 Considerações Finais do Capítulo.....	13
<b>Capítulo 3 Algoritmo Branch and Bound</b>	<b>15</b>
3.1 Introdução .....	15
3.2 Algoritmo Geral.....	16
3.3 Revisão Bibliográfica .....	18
<b>Capítulo 4 Algoritmo Híbrido</b>	<b>19</b>
4.1 Introdução .....	19
4.2 Modelo Heurístico AHC .....	20
4.3 Modelo Matemático B&B .....	23
4.3.1 Função Objetivo.....	24
4.3.2 Restrições.....	24
4.4 Algoritmo Híbrido .....	26

<b>Capítulo 5 Testes e Resultados</b>	<b>27</b>
5.1 Introdução.....	27
5.2 Sistema de 23 Barras .....	27
5.3 Resultados para o Sistema de 23 Barras.....	30
5.4 Sistema de 33 Barras .....	31
5.5 Resultados para o Sistema de 33 Barras.....	34
5.6 Sistema de 49 Barras .....	36
5.7 Resultados para o Sistema de 49 Barras.....	39
5.8 Considerações Finais do Capítulo .....	40
<b>Capítulo 6 Conclusões</b>	<b>43</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>45</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1: Estrutura Básica da Dissertação .....	7
Figura 3.1: Exemplo de árvore Branch and Bound .....	17
Figura 4.1: Numeração dos Ramos .....	21
Figura 4.2: Fluxograma do AHC .....	22
Figura 4.3: Fluxograma do AHC usando a rotina BFS .....	23
Figura 4.4: Estrutura do Algoritmo Híbrido .....	26
Figura 5.1: Sistema de 23 Barras – Conexões de Linhas Candidatas .....	28
Figura 5.2: Configuração Final do Sistema de 23 Barras .....	31
Figura 5.3: Sistema de 33 Barras – Conexões de Linhas Candidatas .....	32
Figura 5.4: Configuração Final do Sistema de 33 Barras .....	35
Figura 5.5: Sistema de 49 Barras – Conexões de Linhas Candidatas .....	36
Figura 5.6: Configuração Final do Sistema de 49 Barras .....	40



# Lista de Tabelas

Tabela 5.1. Dados de Demanda nas Barras – Sistema de 23 Barras.....	29
Tabela 5.2. Dados dos Comprimentos das Linhas – Sistema de 23 Barras .....	29
Tabela 5.3. Dados dos Tipos de Condutores – Sistema de 23 Barras.....	30
Tabela 5.4. Dados de Demanda nas Barras – Sistema de 33 Barras.....	33
Tabela 5.5. Dados dos Comprimentos das Linhas – Sistema de 33 Barras .....	33
Tabela 5.6. Dados de Demanda nas Barras – Sistema de 49 Barras.....	37
Tabela 5.7. Dados dos Tipos de Condutores – Sistema de 49 Barras.....	37
Tabela 5.8. Dados dos Comprimentos das Linhas – Sistema de 49 Barras .....	38
Tabela 5.9. Tempos de Convergência para os Sistemas Testes .....	41



# Capítulo 1

## Introdução

Este trabalho trata de assunto relacionado com a área de Planeamento da Expansão de Sistemas Eléctricos.

Para justificar a importância desta área para a sociedade, é conveniente falar um pouco da Indústria de Energia Eléctrica (IEE) e da sua relação com o Sistema Eléctrico de Potência (SEP).

A IEE é composta de diversos setores compreendidos entre a produção e a comercialização da energia eléctrica. Assim, abrange desde o processo de geração de energia eléctrica em usinas hidreléctricas ou térmicas, o transporte desta energia através das redes eléctricas, composta pelos Sistemas de Transmissão e Distribuição, até o processo de venda de electricidade ou comercialização.

Esta indústria teve como ponto de partida a invenção do dínamo em 1867 (Glover & Sarma, 2008), feito que permitiu à sociedade, a possibilidade de sonhar com os benefícios advindos de sua utilização em forma industrial para a produção da energia eléctrica.

Na década de 1880 muitas empresas de energia eléctrica foram formadas nos Estados Unidos da América. Nesta época, os geradores eram movidos com a força das águas e a aplicação da energia eléctrica era para iluminar e controlar as vias públicas. Em 1882, Thomas Edison colocou em operação a usina termoeléctrica de Pearl Street, e este é considerado o primeiro evento importante para esta indústria, marcando o seu início e o início da distribuição de energia eléctrica em corrente contínua para a iluminação pública e para os escritórios de negócios da cidade de Nova York (Glover & Sarma, 2008).

Com o decorrer dos anos, a IEE se desenvolvia com a produção dos motores eléctricos e com o incremento na utilização das lâmpadas eléctricas. No ano de 1886 os sistemas desenvolvidos em corrente contínua enfrentaram a sua primeira limitação: o problema da queda de tensão (as empresas podiam fornecer a energia eléctrica somente a poucas distancias da usina geradora). Este era um problema de difícil solução porque os valores de tensão eléctrica não podiam ser incrementados e nem diminuídos.

Neste contexto, vale mencionar que em 1885 começa o desenvolvimento dos sistemas de corrente alternada. O principio de funcionamento de transformadores é apresentado em uma feira internacional, e George Westinghouse compra os direitos de patente de Gouland-Gibbs e passa a construir transformadores para operar em corrente alternada.

Assim, em 1886 se estabelece o primeiro sistema comercial de corrente alternada em sistemas de distribuição que utiliza transformadores, nos Estados Unidos da América, na cidade de Great Barington. Porém, o desenvolvimento fundamental deste tipo de sistema se dá com o desenvolvimento do motor de corrente alternada, desenvolvido por Nikola Tesla em 1892 (Glover & Sarma, 2008).

Com a utilização do sistema de corrente alternada, os problemas da queda de tensão foram contornados.

Considerando o transporte da energia neste tipo de sistema, a primeira linha de transmissão em corrente alternada trifásica construída nos Estados Unidos da América foi instalada em 1893 na cidade de Califórnia (Glover & Sarma, 2008), com tensão de 2,3 kV e uma distância percorrida de 12 km. Ainda de acordo com Glover & Sarma (2008), em 1891, na Alemanha, entrava em operação uma linha trifásica com tensão de 12 kV e um comprimento de 179 km. Já em 1896 a primeira usina hidrelétrica que podia transmitir corrente alternada a longa distância foi inaugurada nas cataratas do Niágara com um comprimento de 32 km até a cidade de Buffalo, que foi a primeira cidade fornecida com corrente alternada transmitida.

Enquanto nos Estados Unidos a IEE se desenvolvia, primeiro com o sistema em corrente contínua, e depois com o sistema em corrente alternada, no Brasil também começaram os investimentos para se usufruir dos benefícios que a energia elétrica trazia para a sociedade. As primeiras redes elétricas urbanas foram construídas com os usuários recebendo a energia no sistema de corrente contínua.

A energia elétrica era produzida em pequenas centrais dispersas no meio urbano, com pouca segurança no fornecimento. Posteriormente essas centrais foram substituídas por outras de corrente alternada, que com a utilização de transformadores, tornou-se possível o transporte da energia por distâncias cada vez maiores. Esta substituição tornou possível a conexão de redes, estabelecendo desta forma um fornecimento de energia mais confiável.

Sobre o desenvolvimento da IEE no Brasil vale a pena citar a inauguração da iluminação da Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II, na cidade de Rio de Janeiro em 1879 (Marcolin, 2005). Depois de quatro anos, foi inaugurada mais uma iluminação pública, no distrito de Campos, também no Rio de Janeiro (Silva, 2006). Ainda neste mesmo ano entrou em operação a pequena usina de Ribeirão do Inferno, no Estado de Minas Gerais, onde foi construída a primeira linha de transmissão do Brasil (Moreira, 2012).

Porém, a primeira usina hidrelétrica do Brasil e da América Latina, considerando capacidade de geração ou porte, foi a Usina de Marmelos, construída em 1889 (Moreira 2012). A construção desta usina é considerada um marco no desenvolvimento da IEE no país.

Desde seu início, em 1882, até os nossos dias a IEE se expandiu e vem rompendo barreiras baseando nas reduções contínuas no preço da eletricidade e, principalmente aos avanços tecnológicos já conquistados e a criatividade da engenharia.

Existe uma relação entre a IEE e um Sistema Elétrico de Potência.

Um SEP é considerado como sendo o instrumento viabilizador da IEE, ou seja, sem SEP não existiria a IEE.

O SEP existente no Brasil é composto por longas linhas de transmissão, pois quase toda a energia elétrica que é produzida no país é gerada longe dos centros de consumo, tendo que ser transportada por muitos quilômetros. O Brasil é um país que tem uma dimensão continental e sobre este aspecto, tanto a transmissão quanto a distribuição da energia elétrica que é produzida é uma tarefa que é desempenhada graças à presença de muitas, milhares de linhas de transmissão e de distribuição, subestações, centros de transformação, transformadores de potência, chaves seccionadoras e mais outros milhares de equipamentos que, interligados, permitem que a energia elétrica que é produzida alcance todos os seus consumidores.

Um sistema deste tipo é considerado como um sistema de grande porte e para permitir que este possa operar com qualidade, é necessário a realização da atividade de planejamento.

De acordo com Sampaio (2008), planejamento é um processo contínuo e dinâmico que consiste em um conjunto de ações intencionais, integradas, coordenadas e orientadas para tornar realidade um objetivo futuro, de forma a possibilitar a tomada de decisões antecipadamente considerando aspectos como o prazo, custos, qualidade, segurança, desempenho e outras condicionantes. Assim uma das consequências a evitar são as interrupções de fornecimento de energia, que podem acontecer por diferentes motivos, relacionados a desastres ambientais como tormentas, tempestades, terremotos, ou também por problemas decorrentes de falhas de projeto, operações incorretas de equipamentos ou ainda erros de planos de operação e de planejamento (Henderson, 2014). Esses motivos mostram que a área de planejamento de sistemas elétricos é fundamental para a sociedade, e que a eletricidade é a alma de qualquer sociedade, isso porque a perda generalizada de eletricidade interrompe a economia e perturba a rotina diária das pessoas e no pior dos casos, que está se tornando cada vez mais comum, esta perda pode resultar na perda de vidas e agravar as consequências das catástrofes naturais.

## 1.1 O Problema

O processo de Planejamento de Sistemas Elétricos de Potência é extremamente complexo e não pode ser resolvido sem que sejam feitas simplificações. Neste sentido, o SEP pode ser descomposto, considerando as suas características funcionais, em Sistemas de Geração, de Transmissão, de Distribuição e de Comercialização. Como uma metodologia para resolver o problema de Planejamento de Sistemas Elétricos de Potência, este planejamento costuma ser dividido entre os seus principais agentes: Planejamento de Sistemas de Geração, de Transmissão e de Distribuição. A área de pesquisa deste trabalho está vinculada ao problema do Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição (PESD).

As redes de distribuição são as responsáveis por permitir que a energia elétrica produzida pelos Sistemas de Geração, que é transportada até as subestações de distribuição através dos Sistemas de Transmissão, flua das subestações para as indústrias, para o comércio e para as residências. Estas redes são estabelecidas para o atendimento da demanda de energia elétrica. Porém, devido a limitações técnicas, em vários períodos existe a necessidade de expandi-la, para que seus usuários possam ser atendidos da melhor maneira possível. Assim, a solução do problema relacionado com esta pesquisa consiste na determinação da capacidade e da localização dos novos equipamentos e instalações para a rede de distribuição e que são necessários para o atendimento da demanda futura levando em consideração a capacidade, as quedas de tensão do sistema e a segurança (Willis, 2004).

O PESD busca a solução para o atendimento das demandas considerando leis físicas (restrições operacionais) e restrições econômicas. De acordo com Khator & Leung (1997) os modelos de otimização empregados para solucionar este problema, de uma forma geral, podem ser elencados nas seguintes categorias: (I) Modelos para Alimentadores Individuais, (II) Modelos para um Sistema de Alimentadores, (III) Modelos Duas Fases, (IV) Modelos Subestação-Alimentadores.

Dentro deste assunto, quanto mais exato for o modelo, mais difícil é a sua solução. Assim, existem boas aproximações para os modelos matemáticos empregados no PESD que utilizam programação linear para sua solução, e representações que necessitam um maior esforço computacional, utilizando-se, por exemplo, a programação não linear ou então a programação inteira mista.

Este trabalho apresenta um novo algoritmo chamado de Algoritmo Híbrido (AHB), para resolver o problema de PESD. O algoritmo possui a capacidade de conciliar duas estratégias diferentes para resolver o problema, motivo pelo qual origina o seu nome “híbrido”. A primeira estratégia busca estabelecer uma solução de boa qualidade para o problema, através de uma técnica heurística, característica própria dos algoritmos conhecidos como iterativos tais como os Algoritmos Heurísticos Construtivos (AHCs) e também as meta-heurísticas. A segunda estratégia busca estabelecer a solução ótima para o problema através de uma técnica de otimização clássica ou de programação matemática, diminuindo o espaço de busca com a utilização da solução obtida através da aplicação da primeira estratégia do algoritmo como uma solução inicial ou incumbente do segundo processo.

Neste contexto, os algoritmos que foram utilizados para compor esta pesquisa foram: O algoritmo heurístico iterativo conhecido como Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) e o Algoritmo de Otimização Clássica conhecido como Branch and Bound (B&B).

A implementação computacional utilizada para executar a primeira estratégia do algoritmo foi baseada no AHC apresentado em Mendonça (2014). Este é um algoritmo iterativo que utiliza um indicador de sensibilidade para a tomada de decisão, e que é estabelecido por informações que são fornecidas por uma rotina que resolve o fluxo de carga AC através do método Backward-Forward Sweep (BFS).

Já para a implementação computacional utilizada para executar a segunda estratégia do algoritmo, foi estabelecida uma formulação matemática baseada no trabalho apresentado em Barreto (2007).

Levando em consideração a classificação estabelecida em Khator & Leung (1997), o algoritmo híbrido implementado, considera uma rede com uma subestação com pontos de demanda e pontos de fornecimento, e o objetivo é determinar um caminho para conectar a subestação com os pontos de demanda, com um mínimo custo de construção possível.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi estabelecer e implementar um novo algoritmo (AHB), com a capacidade de utilizar duas estratégias diferentes para resolver o problema de PESD, procurando melhorar o desempenho computacional para aplicação em sistemas de grande complexidade.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para estabelecer o objetivo geral deste trabalho, foram considerados como objetivos específicos:

- Analisar novos tipos de algoritmos que combinam duas técnicas com diferentes características e suas aplicações para o problema PESD.
- Desenvolver um programa computacional para o novo algoritmo.
- Realizar testes computacionais com o novo algoritmo.
- Avaliar o desempenho do algoritmo.

## **1.3 Justificativa**

A energia elétrica é, tradicionalmente, utilizada para fornecer iluminação, força motriz, frio, calor e para eletrólise em processos produtivos, entre outras. Na economia atual, além dessas funções, dependem da energia elétrica as atividades de informática e telecomunicações que são a base para a expansão do setor industrial e para o setor de serviços que vem apresentando uma verdadeira explosão de crescimento. A sociedade da informação não funciona sem energia elétrica.

Nesse contexto é que são desenvolvidos muitos trabalhos que abordam a energia elétrica em distintas áreas e uma delas é o PESD. A literatura especializada mostra que nas últimas décadas vêm sendo desenvolvidos vários trabalhos propondo novas metodologias para resolver o problema do PESD, cujo objetivo clássico é o de minimizar custos de investimentos e de operação do sistema satisfazendo um conjunto de restrições físicas, operacionais e financeiras. A relevância de pesquisas nesta área se justifica à medida que é nesta parte do sistema que ocorre frequentemente o aumento da demanda de energia elétrica e se encontra a maior parte dos consumidores e uma parcela significativa de perdas técnicas.

Devido ao crescimento desta demanda de energia elétrica e à necessidade de atender aos consumidores com qualidade de fornecimento de energia, é que as empresas distribuidoras desenvolvem ferramentas computacionais a partir de técnicas de otimização e heurísticas adotadas no processo de planejamento. Desta forma, torna-se importante para os departamentos de planejamento das empresas de distribuição o desenvolvimento dessas ferramentas computacionais para análise e planejamento, levando-se em consideração o montante dos investimentos a serem aplicados nos projetos de planejamento das redes de distribuição.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo foi feita uma introdução ao assunto onde se procurou trazer algumas informações históricas e contextualizar a importância da área de planejamento de sistemas elétricos para a sociedade. Neste capítulo definiu-se também o problema a ser abordado nesta pesquisa assim como o objetivo geral, objetivos específicos e a justificativa do trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas as principais características dos algoritmos heurísticos, conceitos e tipos, assim como uma revisão bibliográfica sobre os AHCs. Da mesma forma que neste capítulo, no capítulo 3 são apresentadas as principais características e uma revisão bibliográfica dos algoritmos matemáticos, principalmente o algoritmo B&B.

No Capítulo 4 é apresentada a proposta do AHB, junto com as suas principais características e forma de operação que permite determinar os custos mínimos através da otimização.

No Capítulo 5 são apresentados os testes e resultados obtidos através da simulação dos algoritmos para três sistemas testes de 23, 33 e 49 barras. É apresentada uma análise destes resultados. Para realização da análise do AHB, primeiro foi considerado o desempenho do AHC e do B&B para a resolução do problema e depois o desempenho do AHB para estabelecer a solução.

Finalmente no capítulo 6, apresentam-se as conclusões e as análises finais com as sugestões para trabalhos futuros.

A Figura 1.1, a seguir, ilustra a relação entre os capítulos, representando a estrutura básica da dissertação.

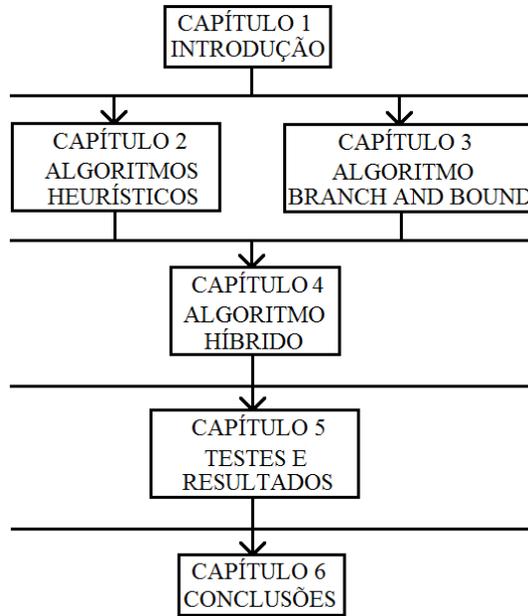


Figura 1.1 Estrutura Básica da Dissertação



# Capítulo 2

## Algoritmos Heurísticos

### 2.1 Introdução

Heurística é um método ou processo criado com o objetivo de encontrar soluções para um problema. É um procedimento simplificador que, em base de questões difíceis envolve a substituição destas por outras de resolução mais fácil a fim de encontrar respostas viáveis. Tal procedimento pode ser tanto uma técnica deliberada de resolução de problemas, como uma operação de comportamento automática, intuitiva e inconsciente.

Dentro desse contexto, os Algoritmos Heurísticos (AHs), também conhecidos como algoritmos de busca local tem demonstrado ser a classe de algoritmos de aproximação mais bem sucedidos. Eles produzem soluções de alta qualidade de forma iterativa por aplicar pequenas modificações a uma solução, na esperança de encontrar uma melhor.

Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável como visto em Mendonça (2014). Existem fatores que podem tornar interessante a utilização de AHs na resolução de um determinado problema:

- (1) Na utilização como passo inicial ou dado de entrada para outros algoritmos, potencialmente exatos ou heurísticos (o seu resultado seria tratado com um dado de entrada).
- (2) Quando a resolução de um problema de forma real for complexa ou não exista resolução exata (chegar próximo de uma solução ótima é extremamente válido).
- (3) Quando não é necessária a solução ótima porque o problema pode sofrer várias alterações a todo o momento (uma solução intermediária é válida).
- (4) Quando a quantidade de dados não é a necessária.
- (5) Quando é necessário que o resultado seja calculado de forma rápida, ou seja, há restrições de tempo e dinheiro.

- (6) Quando não existe um método exato para a resolução deste problema ou o mesmo requer um tempo muito alto de processamento (uma solução boa é melhor do que não ter nenhuma solução).
- (7) Quando não é necessária a solução ótima (as soluções obtidas já são razoáveis).
- (8) Quando os dados são pouco confiáveis (a busca pela solução ótima não tem sentido, pois a mesma será uma aproximação da realidade).

Em consideração a estes fatores, para o problema abordado no PESD os fatores (1), (2), (5) e (6) têm relevância, sobretudo na forma para o tratamento dos resultados obtidos com a busca da solução. Neste assunto, o tamanho do problema a ser resolvido, o modelo matemático para representar o problema, a consideração de restrições não lineares, tempos de processamento proibitivos, tudo isto pode interferir na maneira que se busca para resolver o problema, e neste sentido, um algoritmo heurístico como primeira estratégia para busca de solução pode se tornar atrativo em um processo.

Os AHs encontram soluções de boa qualidade para sistemas de grande porte e a qualidade dessas soluções pode ficar muito distante da solução ótima ou mesmo sub-ótimas. A vantagem dos algoritmos heurísticos é que são simples de entender, robustos e muito rápidos, e a desvantagem é que eles não podem garantir o ótimo global. No momento, os algoritmos heurísticos ainda representam um campo de pesquisa muito interessante e as soluções encontradas por esses algoritmos podem ser usadas como base para encontrar soluções melhores usando algoritmos que demandam maior esforço computacional, como é o caso das meta-heurísticas.

As meta-heurísticas são algoritmos baseados no princípio da busca local, ou seja, começando a partir de uma solução inicial, uma vizinhança em torno dela é investigada, e se uma solução melhor pode ser identificada, esta se torna a nova solução corrente; este processo é repetido. Assim, a ideia central é se concentrar na busca de melhores soluções em regiões do espaço de busca nas proximidades já identificadas. Algumas das mais conhecidas meta-heurísticas pesquisadas na área de PESD são: Colônia de Formigas (Gómez et al., 2004), Busca Dispersa (De Pádua, 2014), Algoritmo Genético (De Camargo, 2014) e Busca Tabu (Cossi, 2008).

As pesquisas apresentadas usando meta-heurísticas indicam que, no momento, esses algoritmos são os mais competitivos para encontrar soluções de excelente qualidade de sistemas complexos. Também não é fácil identificar o algoritmo mais competitivo da família das meta-heurísticas para o problema de PESD.

Desde a década de 80 do século passado, muita pesquisa foi investida na busca da solução do PESD com a utilização de AHs, que acabaram por se tornar uma alternativa em relação aos métodos de programação matemática. Apesar do fato de que os AHs não têm a capacidade, pelo menos do ponto de vista teórico, de encontrar a solução ótima global de um problema complexo,

eles geralmente são simples de entender e de implementar computacionalmente. Este fato tem feito com que os métodos heurísticos ganhassem espaço e campo para pesquisas.

A proposta deste trabalho é desenvolver um algoritmo que utiliza duas estratégias para resolver o problema. Assim, a ideia é utilizar um algoritmo heurístico do tipo construtivo como primeira estratégia para estabelecer uma solução inicial para o problema. A segunda estratégia consiste em utilizar a solução obtida através da primeira estratégia como “dato de entrada” para um algoritmo de otimização clássica do tipo Branch and Bound a ser resolvido através de programação matemática.

Na próxima seção é apresentada uma introdução sobre o AHC.

## 2.2 Algoritmo Heurístico Construtivo

O AHC é um procedimento iterativo de escolhas ou decisões tomadas passo a passo que, de maneira sistemática, busca determinar uma boa proposta de solução para um problema complexo. A partir de uma configuração base (que pode ser representada através dos dados iniciais do sistema elétrico), em cada passo é adicionado ao sistema um ou vários circuitos até o momento em que o conjunto de adições realizadas permita uma operação adequada do sistema elétrico.

Dessa maneira pode-se dizer que em cada passo do algoritmo a configuração do sistema é modificada pela adição de um ou vários circuitos, e esta configuração obtida passa a ser denominada como configuração corrente. Assim, o circuito escolhido em cada passo para ser adicionado à configuração corrente é um circuito que corresponde ao caminho mais atrativo identificado pelo chamado indicador de sensibilidade ou índice de desempenho.

O indicador de sensibilidade (IS) pode ser estabelecido pelos dados de entrada do problema a ser resolvido. Por exemplo, se o problema é planejamento da expansão de um sistema elétrico, os dados de entrada que são utilizados para calcular o IS podem ser escolhidos dentre os valores da corrente, tensão, impedância ou potência do sistema, que quase sempre são dados de entrada, considerando a solução de fluxo de potência.

A importância do IS é primordial para o AHC. Ele é o responsável pela tomada de decisão do processo sistemático, ou em outras palavras, é ele que define a construção da solução para o problema passo a passo. Ele é um indicador que pode assumir características diferentes conforme a natureza do problema. De alguma maneira, ele deve estar relacionado com a variação da função objetivo ou com algo que relaciona esta variação durante o processo de solução do problema, isto quando se considera a presença de um modelo matemático representando o problema. Quando não há modelo matemático ele tem que ser baseado nos conhecimentos e na sensibilidade de um especialista.

## 2.3 Revisão Bibliográfica

O primeiro algoritmo heurístico de grande difusão usado em planejamento de sistemas elétricos foi o AHC apresentado em Garver (1970). Uma das características deste trabalho foi que ele utiliza um modelo matemático conhecido como o modelo de transportes. Além disso, o trabalho de Garver é muito importante porque dá o início a fase dos AHCs que começaram a ser desenvolvidos e que foram utilizados nas décadas seguintes ao trabalho.

Após este trabalho apareceram novas pesquisas sugerindo um novo modelo matemático para a representação do problema, o Modelo DC. A diferença entre os dois modelos está no fato de que, enquanto o Modelo de Transporte tinha o compromisso de representar o problema apenas através da Lei de Correntes de Kirchhoff e das restrições de capacidades de circuitos, o modelo matemático denominado Modelo DC era uma evolução deste modelo, porque além da Lei de Correntes de Kirchhoff e das restrições relacionadas com a capacidade de circuitos, também havia uma restrição que representava a Lei de Tensões de Kirchhoff.

O AHC apresentado em Monticelli et al. (1982) conhecido como Algoritmo de Mínimo Esforço é um AHC que utilizava como modelagem matemática o Modelo DC. Além disso, utiliza um indicador de sensibilidade para identificar um circuito que é adicionado ao sistema com o objetivo de reduzir as sobrecargas do sistema elétrico. A modelagem permitia que os circuitos fossem sobrecarregados.

Uma versão diferente para este algoritmo foi apresentada em Pereira & Pinto (1985) conhecido como Algoritmo de Mínimo Corte de Carga. Com relação à técnica de solução, também utilizava um AHC e a filosofia é parecida com a apresentada em Monticelli et al. (1982), ou seja, o indicador de sensibilidade identifica um circuito para adicionar ao sistema mas neste caso o circuito adicionado produzia uma maior redução no corte de carga no sistema elétrico.

No trabalho de Romero et al. (2003) foi feita uma análise sobre alguns AHC aplicados ao planejamento da expansão dos sistemas de transmissão com suas modelagens matemáticas estendidas para programação multiestágios. Em Romero et al. (2005) é apresentado um novo AHC, que possuía características do algoritmo apresentado por Garver (1970) mas que utilizava o Modelo DC para a representação da rede.

Em Romero et al. (2007) é proposto um AHC dentro de uma estrutura B&B com o objetivo de fornecer melhores soluções, em algoritmos de grande porte que requerem de um maior esforço computacional. Em Escobar et al. (2011) utiliza-se os AHCs para gerar soluções iniciais de boa qualidade e que são usadas em algoritmos genéticos para assim obter maiores velocidades de convergência e melhorar a qualidade das soluções finais em sistemas testes de alta complexidade.

Pode-se dizer que, diferente do que acontece com o Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão, em PESD existem poucas pesquisas que empregam os AHCs para a busca da solução.

Exemplos de aplicação destes algoritmos podem ser encontrados em Lavorato (2010), Rocha et al. (2012a), Rocha et al. (2012b) e em Mendonça (2014).

Em Lavorato (2010) o problema foi modelado como um problema Programação Não-Linear Inteiro Misto (PNLIM) e foi proposto um AHC para a busca de solução. Em cada iteração do AHC, um problema de Programação Não-Linear (PNL) era resolvido para obter um indicador de sensibilidade que era usado para adicionar um circuito, uma subestação, um banco de capacitores ou reguladores de tensão. O problema de PNL era obtido com o relaxamento da natureza binária das variáveis de decisão que eram consideradas como variáveis contínuas (mas restritas). O objetivo do problema de PNL era minimizar os custos da operação e de construção do sistema de distribuição em um determinado espaço de tempo previamente definido, e as restrições eram a demanda atendida, os níveis de tensão exigidos, a capacidade dos circuitos e das subestações e a configuração radial do sistema.

Em Mendonça (2014) é apresentado um AHC especializado que não utiliza modelagem matemática, este é um algoritmo que trabalha com parâmetros para que o esforço computacional não seja muito grande. O AHC utiliza dois indicadores de sensibilidade diferentes, o primeiro relacionado ao valor da tensão dos barramentos que estão conectados ao sistema e por onde podem se conectar os circuitos que são candidatos à adição. O segundo considera a informação das perdas elétricas. Ambos indicadores utilizam uma sub-rotina baseada no algoritmo de varredura BFS para a solução do fluxo de potência.

Em Rocha et al. (2012b) foi apresentado um AHC para resolver um novo modelo matemático para a representação da rede em sistemas de distribuição, denominado de Modelo Híbrido Linear. Esse modelo é resolvido usando Programação Inteira Mista (PIM). A ideia do trabalho foi adaptar um modelo híbrido que havia sido empregado amplamente para o planejamento da expansão de sistemas de transmissão para a aplicação no PESD.

Em Rocha et al. (2012a) foi apresentado um novo AHC para ser aplicado no PESD, e diferente da maioria dos trabalhos, para compor as informações para o indicador de sensibilidade foi utilizado os resultados obtidos através da solução estabelecida por uma sub-rotina que calculava o fluxo de potência CA através do método de Newton-Raphson.

No trabalho apresentado por Brandt (2016) é proposto um novo AHC, porém com uma nova estratégia: para o sistema a ser resolvido considera-se que todas as opções de linha estejam construídas e em cada passo do algoritmo, através de um indicador de sensibilidade, é proposta a retirada de uma linha, até que a solução estabeleça um sistema radial.

## 2.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo procurou-se mostrar as aplicações e a importância dos AHs para o processo de busca de solução em problemas relacionados com SEP.

Foi verificado que o problema de PESD é amplo e neste sentido foi estabelecido que a pesquisa que foi desenvolvida iria tratar do problema de planejamento da expansão de redes aéreas de média tensão de sistemas de distribuição, procurando resolver o problema da localização e capacidade ótimas de novos circuitos.

Foi realizada uma introdução às técnicas heurísticas de solução empregadas na busca da solução para o PESD, relacionando estas técnicas com trabalhos encontrados na literatura especializada.

Entre estas técnicas empregadas para a solução, estão as que utilizam o Algoritmo Heurístico Construtivo. A estrutura de um AHC empregado para o planejamento da expansão de redes elétricas foi definida.

Foi verificado que os AHCs já foram amplamente utilizados em Planejamento de Sistemas de Transmissão, porém não existe ainda muita aplicação, destes algoritmos, divulgada na literatura especializada para a busca de solução dos problemas relacionados com o PESD, especialmente quando o problema é a localização e a capacidade ótima de novos circuitos.

Em planejamento de sistemas elétricos, a maioria dos trabalhos utilizam uma modelagem matemática para a representação do problema. O que diferencia um trabalho com relação ao outro é a técnica aplicada para a solução ou o modelo matemático utilizado na representação do problema.

# Capítulo 3

## Algoritmo Branch and Bound

### 3.1 Introdução

Os métodos de otimização clássica são também chamados métodos de programação matemática. Esses métodos normalmente apresentam como resultado uma única solução ótima global, baseada em modelos que contêm muitas simplificações, e quando a adequação dessa solução é testada com as ferramentas de análise a mesma pode não atender os requisitos operativos, e as possíveis alterações fora do ambiente de síntese, podem levar a um distanciamento muito grande da região ótima.

Os mais conhecidos, de forma geral são: Branch and Bound (B&B), Branch and Cut, Branch and Price e Decomposição de Benders (Dumitrescu & Stützle, 2003), sendo o algoritmo B&B o mais utilizado na área de planejamento da expansão de sistemas elétricos.

A ideia de usar o algoritmo B&B para resolver problemas de programação inteira usando relaxações de programação linear foi proposta por Land & Doig (1960). Este algoritmo consiste em uma estratégia de relaxação e separação para resolver um problema complexo, que utiliza como estrutura de resolução a construção de uma árvore, onde os nós representam os problemas candidatos e os caminhos representam as novas restrições que devem ser consideradas.

Por intermédio dessa árvore, todas as soluções inteiras da região viável do problema são enumeradas de modo implícito ou explícito, o que garante que todas as soluções ótimas sejam encontradas.

O tipo de algoritmo B&B melhor estudado e analisado é o que resolve problemas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com espaços de busca geralmente muito grandes. Pode ser assumido que o espaço de busca de um problema de programação inteiro misto é limitado e o número de alternativas que devem ser investigadas é finito.

O grande problema dos mesmos é que os modelos matemáticos que são adotados são muito complexos e tornam a estrutura a resolver em uma estrutura de grande porte, com excessivos tempos de processamento, sujeito a problemas de convergência e quase sempre com equações do tipo não linear.

Para evitar esse problema de não linearidade é utilizado neste trabalho um modelo linear disjuntivo que é apresentado no próximo capítulo. Esse modelo foi utilizado também

em trabalhos anteriores (Haffner et al., 2004; Rider, 2006; Barreto, 2007) obtendo assim soluções de ótimas qualidades.

A continuação mostra-se os fundamentos e a estrutura de um algoritmo B&B.

## 3.2 Algoritmo Geral

A estrutura geral de um algoritmo B&B possui três elementos fundamentais, separação, relaxação e sondagem. O interesse na separação é utilizar a tática de “dividir para conquistar” a fim de resolver um determinado problema. Enquanto a solução do problema não é possível, o mesmo é separado em dois ou mais subproblemas descendentes, gerando uma lista de problemas candidatos. A seguir, seleciona-se um dos candidatos dessa lista e tenta-se resolvê-lo. Se a solução não é possível o problema é novamente separado e seus descendentes são adicionados à lista dos candidatos; caso contrário, o problema é resolvido e uma nova solução é obtida.

O valor da função objetivo dessa nova solução é então comparado com o valor da solução incumbente, que é a melhor solução viável conhecida até o momento. Caso a nova solução seja melhor do que a solução incumbente, ela se torna a nova incumbente. A seguir, retorna-se a lista e seleciona-se o próximo candidato. Este procedimento é repetido até que a lista esteja vazia, sendo que a solução do problema é assumida como a solução incumbente final.

A forma usual de separação de um problema de programação inteira é através de restrições contraditórias em uma única variável inteira (variável de separação ou de ramificação). Assim, a partir do problema original, origina-se dois novos subproblemas descendentes, que são mais fáceis de resolver que o inicial, já que foi acrescentada uma restrição na variável de separação. A cada nó gerado se associa um subproblema candidato e cada ramo indica o acréscimo de uma restrição relacionada com a variável empregada na separação. Portanto, à medida que se desce na árvore, a região viável dos descendentes gerados vai ficando cada vez mais restrita.

A continuação mostra-se a estrutura de um Algoritmo B&B típico, para um problema de programação inteira mista (PIM).

$$\text{Min} \quad Z = cx \quad (3.1)$$

$$\text{s. a} \quad Ax \leq b \quad (3.2)$$

$$x \text{ inteiro}$$

As Equações 3.1 e 3.2 representam a função objetivo e as restrições do problema respectivamente.

A Figura 3.1 ilustra um exemplo de uma árvore Branch-and-Bound na solução de um determinado problema de minimização na qual existem quatro nós da árvore (nós 0, 1, 2 e 3), um nó sondado (nó 6) e quatro nós ativos (nós 4, 5, 7 e 8). Durante a etapa de solução, as informações de todos os nós ativos e da árvore estão armazenadas em uma mesma estrutura. O nó 6 mostra a solução ótima do problema após de resolver a árvore B&B.

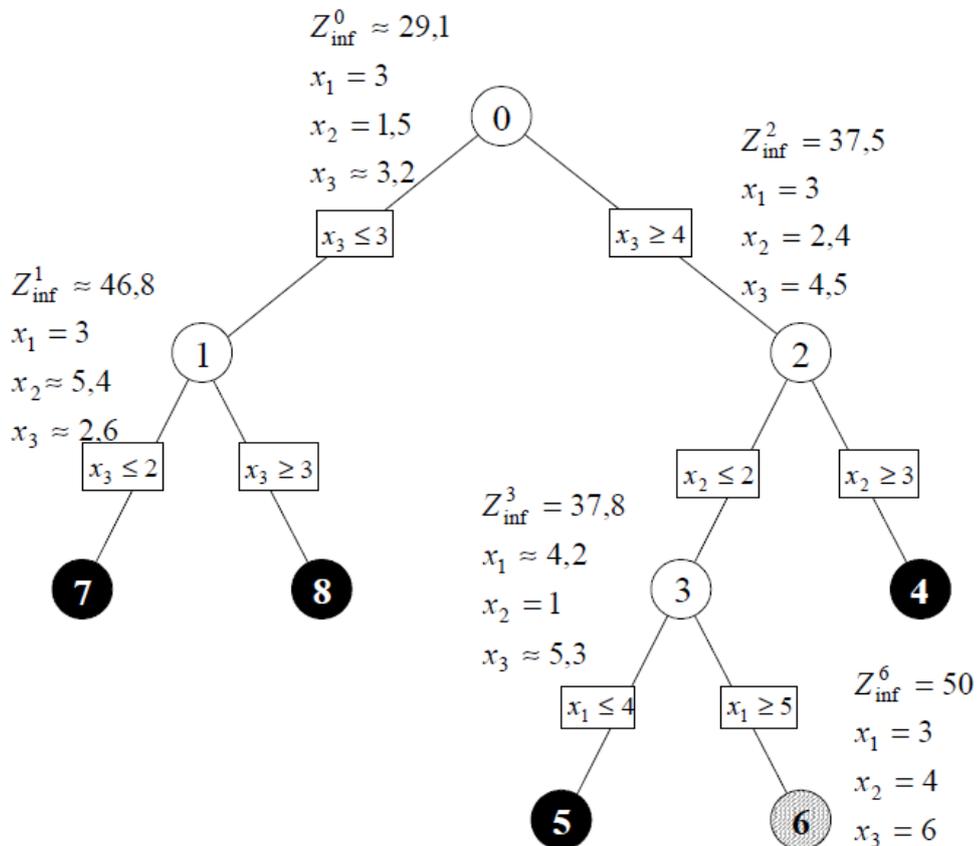


Figura 3.1 Exemplo de árvore Branch and Bound  
Fonte: Barreto (2007)

### 3.3 Revisão Bibliográfica

O primeiro trabalho relevante aplicado ao problema de PESD foi Knight (1960). Através desse trabalho se propôs a utilização de programação inteira mista para resolver o problema de PESD. No decorrer dos próximos anos, novas publicações relacionadas com resultados de novos trabalhos nesta área e na área de transmissão apareceram, e muitos deles utilizavam o algoritmo B&B para encontrar a solução do problema.

Em Haffner et al. (2001) os autores apresentam um algoritmo B&B especializado que utiliza o modelo de transporte para a representação de uma rede de transmissão. A característica do modelo de transporte é que utiliza apenas a Lei Das Correntes de Kirchoff como uma das restrições, relaxando assim a Lei das Tensões. A metodologia proposta permitiu encontrar bons resultados nos sistemas de grande porte que foram testados.

Em Asada et al. (2005) foi utilizado também o modelo de transporte para resolver um planejamento multi-estágio, ou seja planejamento a longo prazo. O algoritmo B&B que utiliza programação inteira mista encontra resultados eficientes e pode-se expandir para o uso de outro modelo matemático como o modelo DC.

Em Rider et al. (2008) foi aplicado um modelo DC onde o algoritmo utilizou o método de pontos interiores para resolver a não linearidade causada pela Lei de Tensões de Kirchoff. O trabalho encontrou além da solução ótima as perdas elétricas do sistema.

Em Sousa et al. (2009) foram utilizadas estratégias de seleção da variável de divisão e de seleção de novos subproblemas para melhorar o desempenho do algoritmo B&B. Uma dessas estratégias é conhecida como o método estimativo.

Em Haffner et al. (2004) foi apresentado um modelo de otimização não linear para o PESD utilizando o algoritmo B&B. Neste trabalho foi utilizado um modelo linear disjuntivo para evitar as não linearidades do modelo inicial. O modelo considerou também a adição, remoção e substituição de circuitos para sistemas pequenos.

Em Barreto (2007) foi apresentado um modelo de otimização que utilizou o algoritmo B&B para resolver o problema de PESD em múltiplos estágios considerando geração distribuída. O modelo matemático considerou varias restrições como leis de corrente e tensões, limites da tensão e corrente, critério de radialidade e também o modelo linear disjuntivo.

Esses foram alguns dos trabalhos mais importantes que mostraram aplicações do algoritmo B&B em sistemas de distribuição e de transmissão. Um algoritmo de programação matemática do mesmo tipo foi utilizado como parte do algoritmo híbrido, que é apresentado no próximo capítulo.

# Capítulo 4

## Algoritmo Híbrido

### 4.1 Introdução

Normalmente, a motivação por trás da hibridação de diferentes técnicas de solução é a busca por melhor desempenho no processo de solução do problema, explorando a união das vantagens e das técnicas de solução puras ou individuais. Em outras palavras busca-se pelo benefício da sinergia durante o processo de solução.

De acordo com Gendreau & Potvin (2010), ao longo dos últimos anos os métodos híbridos vem se tornando cada vez mais populares para o tratamento de problemas de otimização difíceis ou complexos de serem resolvidos.

Ainda não existe uma definição precisa para a combinação de técnicas de solução diferentes, e isto é às vezes motivo de críticas, mas ainda segundo Gendreau & Potvin (2010), a natureza aberta para esta definição é bastante útil, e o autor defende este ponto de vista afirmando que se as fronteiras forem muito estritas entre áreas afins de investigação, isto pode ser um obstáculo para o pensamento criativo e a exploração de novas direções para a pesquisa.

É mais comum a aplicação de hibridação em meta-heurísticas, até pelo grande número de diferentes meta-heurísticas que apareceram nos últimos anos para as mais diferentes áreas de aplicação. O número crescente de aplicações amplamente relatadas sobre a hibridação em meta-heurísticas nas mais variadas áreas de aplicação e eventos científicos dedicados ao assunto, tais como "Workshops on Hybrid Metaheuristics" (Almeida et al., 2006; Bartz-Beielstein et al., 2007; Blesa et al., 2005) justificam a popularidade, o sucesso e a importância desta linha de pesquisa.

A hibridação já foi aplicada em planejamento de sistemas de transmissão. Para obter soluções de boa qualidade, em Escobar et al. (2011) foi apresentado um algoritmo híbrido, resultado da combinação entre um AHC e um Algoritmo Genético. A solução gerada nesses algoritmos foi obtida considerando a simulação em sistemas de grande complexidade, onde o AHC consegue reduzir o espaço de busca inicial, tendo como resultado uma população final formada pelas soluções ótimas e algumas soluções quase ótimas do circuito. O resultado do AHC foi utilizado como dado de entrada para o algoritmo genético que dessa maneira atinge a solução ótima do sistema reduzindo significativamente o esforço computacional.

De acordo com Almeida et al. (2006) existe uma metodologia para classificação de meta-heurísticas híbridas. Esta classificação é baseada no nível de hibridização, na ordem de execução e no controle de estratégia.

Levando em consideração o nível de hibridização, as combinações em alto nível conservam, por princípio, as identidades individuais dos algoritmos originais, que cooperam através de uma interface relativamente bem definida, e neste sentido, não há necessidade de uma forte relação entre eles para o funcionamento interno dos algoritmos. Por outro lado, os algoritmos em combinações de baixo nível dependem fortemente um do outro, há um intercâmbio de componentes ou funções dos algoritmos individuais de forma frequente.

Com relação à ordem de execução, o caso mais simples é aquele em que cada algoritmo é executado individualmente em ordem sequencial, com os resultados obtidos com a execução do primeiro sendo utilizado como dados de entrada para o segundo. Para o outro caso mais sofisticado, os algoritmos são executados de forma entrelaçada e/ou paralela, com informações sendo trocadas com muita mais frequência e em geral de maneira bidirecional.

Por último, mas não menos importante, com relação à estratégia de controle, esta pode ser integrativa ou de colaboração (cooperativa). No caso da integrativa, um algoritmo é o subordinado, e é incorporado como componente no outro. São exemplos para este caso aqueles algoritmos em que existe um trabalho de melhoria local através de um processo de otimização interna que é aplicado para as soluções determinadas para o problema. Em contraste a este caso, na estratégia cooperativa, como o próprio nome diz, existe troca de informações entre os algoritmos individualmente, mas um algoritmo não é parte do outro.

Dentro de todo este contexto, o AHB desenvolvido neste trabalho é do tipo de alto nível em relação ao nível de hibridização, do tipo sequencial em relação à ordem de execução e do tipo cooperativo com relação à estratégia de controle.

Assim o AHB foi composto por duas técnicas de otimização que utilizam algoritmos de diferentes características para a busca de solução, o primeiro é um algoritmo iterativo conhecido como AHC e o segundo um algoritmo matemático chamado algoritmo B&B. Estes algoritmos que compõem o AHB são apresentados nas próximas seções.

## **4.2 Modelo Heurístico AHC**

O AHC utilizado na composição foi o mesmo desenvolvido em Mendonça (2014) e foi implementado em linguagem GAMS. Sua utilização constitui a primeira estratégia do AHB proposto neste trabalho para a busca da solução.

O AHC, através dos dados iniciais da rede e com ajuda de um IS, procura conectar as linhas mais baratas (dentro das disponíveis para conexão) nas barras com melhor perfil de tensão. Dessa maneira é estabelecida uma linha candidata para todos os circuitos selecionados.

A composição matemática para o IS é apresentada a seguir:

$$IE = \left( \frac{v}{c_{ij}} \right) \quad (4.1)$$

$$IS = \max\{IE\} \quad (4.2)$$

Na Equação 4.1,  $v$  representa a magnitude de tensão no barramento que já possui conexão com o sistema e será o local aonde o circuito candidato irá se conectar. O outro elemento desta equação,  $c_{ij}$  representa o custo do respectivo circuito. Desta maneira, para todos os circuitos selecionados na iteração como candidatos à adição para a iteração, um valor para  $IE$  é estabelecido. O circuito escolhido para a adição será aquele com o maior valor estabelecido para  $IE$ , ou seja, será aquele identificado pela Equação 4.2.

Em cada iteração do algoritmo é resolvido o problema de fluxo de potência considerando as linhas construídas até o momento. O fluxo de potência é resolvido através da utilização de uma rotina baseada no método de BFS. Desta forma, em cada iteração estão disponíveis os valores de tensão das barras que já foram conectadas ao sistema.

Esta rotina utiliza uma abordagem orientada aos ramos do sistema para melhorar o desempenho numérico e também um ordenamento por camadas. Com a utilização de camadas é mais fácil estabelecer um ordenamento e localização dos nós extremos e os caminhos à jusante e à montante do sistema. A Figura 4.1 mostra o ordenamento dos ramos por camadas.

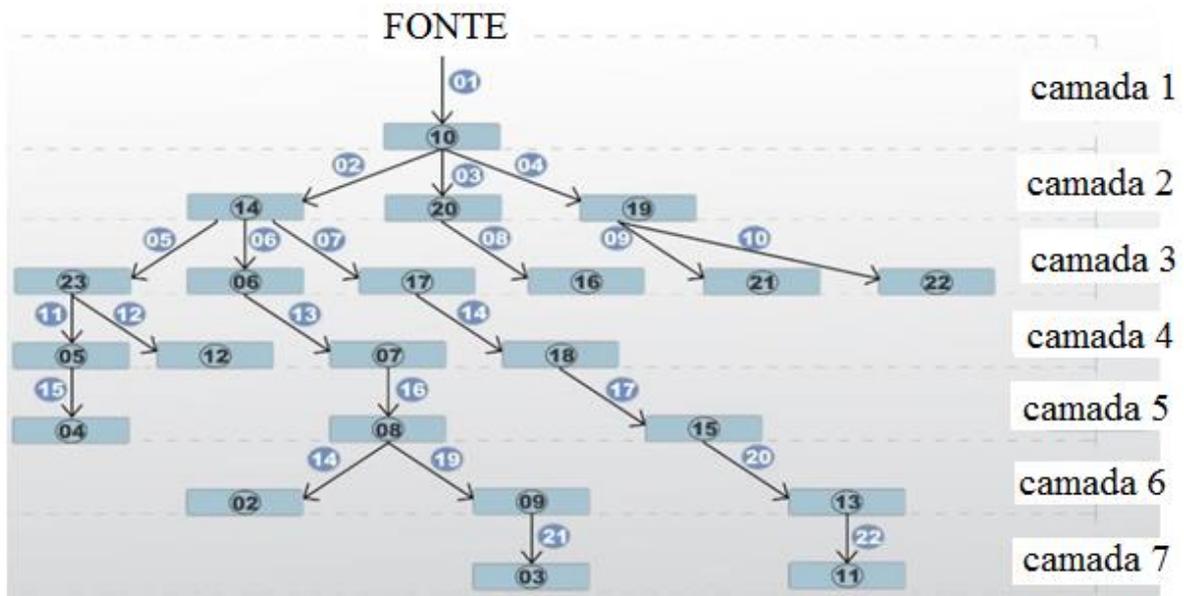


Figura 4.1 Numeração dos Ramos  
Fonte: adaptado de Mendonça (2014)

Todavia, a cada iteração do AHC o sistema passa por alguma mudança e isso ocorre porque a cada iteração do AHC uma linha nova é adicionada ao sistema e por esse motivo a numeração de ramos do mesmo é alterada a cada iteração.

Neste contexto, o algoritmo monta as camadas, sendo estas montadas a partir da subestação, estabelecendo esta como fixa, buscando todos os nós ligados à subestação e monta a primeira camada. Depois ele verifica todos os nós que estão ligados aos nós da primeira camada e monta a segunda camada, e segue esses passos até chegar à última camada do sistema.

A Figura 4.2 ilustra um fluxograma para o AHC.

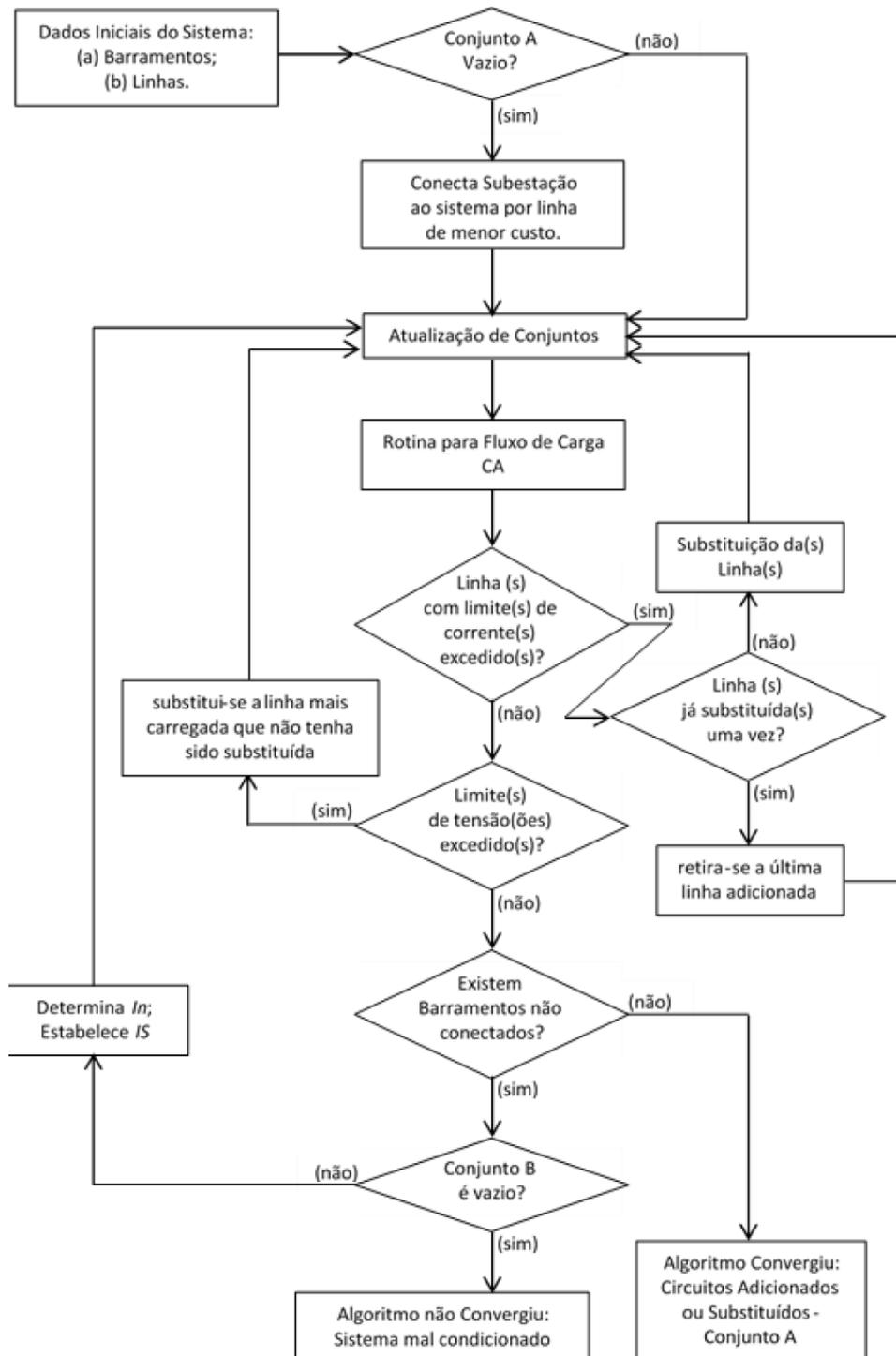


Figura 4.2 Fluxograma do AHC  
Fonte: Mendonça (2014)

A Figura 4.3 ilustra um fluxograma do AHC com o funcionamento da rotina BFS.

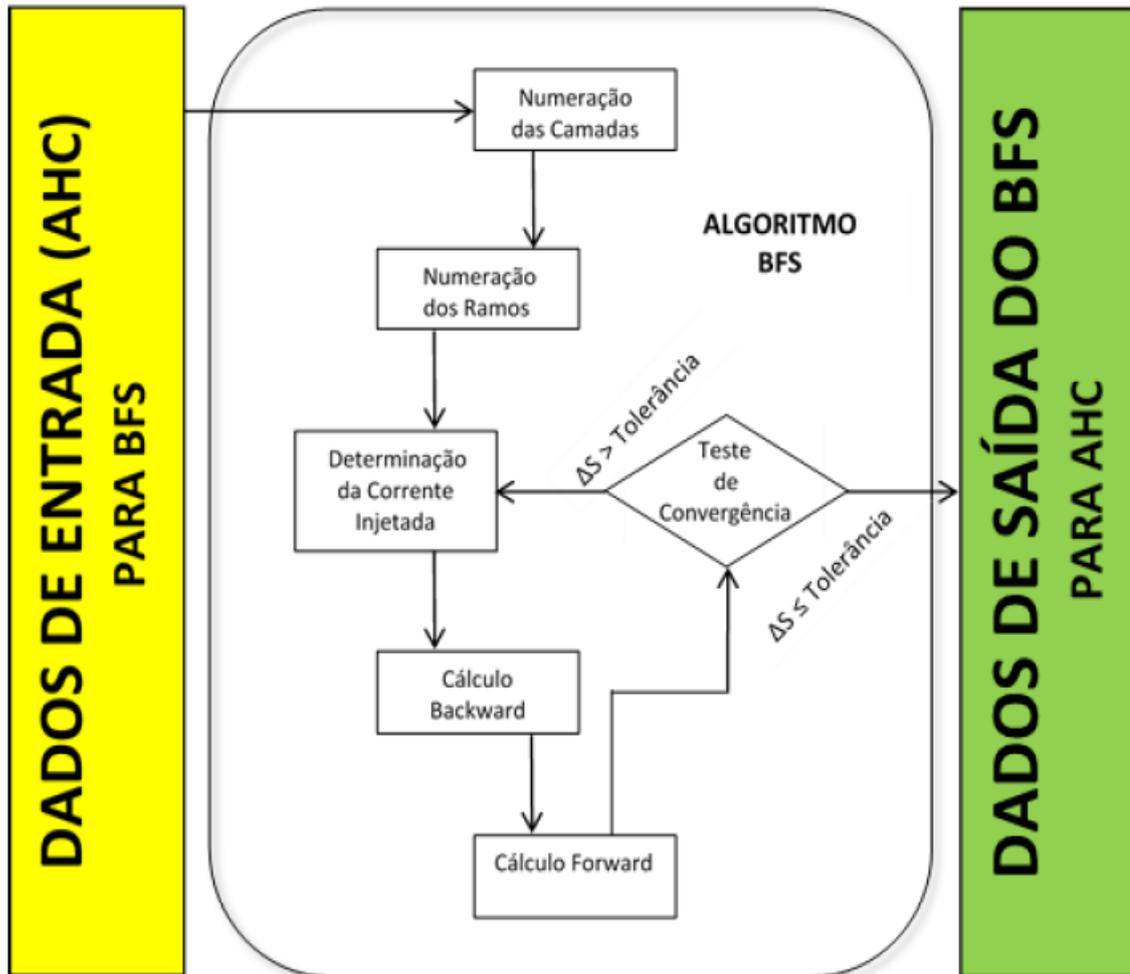


Figura 4.3 Fluxograma do AHC usando a rotina BFS  
Fonte: Mendonça (2014)

### 4.3 Modelo Matemático B&B

O Algoritmo B&B é um método que é resolvido por programação matemática através da programação inteira mista. É apresentada nesta seção a formulação do modelo proposto, objetivando definir a localização e as linhas que deverão ser construídas para que os investimentos sejam executados de maneira eficiente e a rede possa fornecer energia elétrica para a demanda estabelecida pelos consumidores.

O modelo proposto considera a instalação de novas linhas. A função objetivo a ser minimizada representa os custos totais de instalação das linhas na rede. O modelo considera também restrições operacionais relacionadas com a capacidade das linhas e com os limites de tensão, as restrições da lei de correntes e da lei de tensões assim como uma restrição de radialidade.

Assim o problema de PESD é estabelecido como um problema de PIM definido a seguir.

### 4.3.1 Função Objetivo

A função objetivo, cujo valor é atribuído à variável  $P$ , procura minimizar o custo da instalação de novos circuitos. Ela é representada pela Equação 4.3.

$$\text{Min } P = \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} x_{ij} \text{comp}_{ij} \quad (4.3)$$

Onde,

$A$  – Conjunto de circuitos que podem ser adicionados

$C_{ij}$  – Custo associado com a construção de novos circuitos por unidade de comprimento

$x_{ij}$  – Variável inteira associada à adição de novos circuitos

$\text{comp}_{ij}$  – Indica o comprimento das linhas

### 4.3.2 Restrições

A primeira restrição representa a Lei das Correntes de Kirchhoff.

$$Sf + g = d_i \quad (4.4)$$

Na Equação 4.4,  $S$  representa a matriz de incidência nó-ramo do sistema,  $f$  representa o fluxo de corrente que passa pela linha,  $g$  representa o nível de fornecimento de energia nos nós e  $d_i$  é a demanda no nó  $i$ .

A seguinte equação representa a Lei das Tensões de Kirchhoff.

$$Zf + [S]^T V = 0 \quad (4.5)$$

Na Equação 4.5,  $Z$  representa a impedância dos circuitos,  $V$  representa o nível de tensão nas barras. O sobrescrito  $T$  indica matriz transposta, e o produto obtido através de  $[S]^T$  e  $V$  é equivalente à diferença de potencial entre duas barras.

Para escolher um circuito que seja candidato a adição na rede foi necessária a multiplicação do valor  $x_{ij}$  que indicou a existência do circuito com os fluxos ( $f$ ) e as tensões ( $V$ ). Devido a esse processo surgiram não linearidades no modelo e para evita-lo foi adotado uma extensão do modelo linear disjuntivo empregado em Haffner et al. (2004).

Quando formulado desta maneira o problema resultante ficou linear e pôde ser resolvido diretamente por meio de métodos de otimização clássica sem necessidade de aplicar decomposições ou métodos heurísticos. Assim a Equação 4.5 foi substituída pela sua versão disjuntiva apresentada através da Equação 4.6.

$$|Zf + [S]^T V| \leq M(1 - x_{ij}) \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, quando a variável  $x$  assumiu valor nulo, a respectiva restrição foi relaxada, pois  $M$  era grande o bastante para que a desigualdade sempre fosse satisfeita para os valores possíveis de  $V$ . Por outro lado, quando a variável  $x$  assumiu valor unitário, a Equação 4.6 operou da mesma forma que a respectiva igualdade da Equação 4.5.

As seguintes restrições incluíram os limites de fluxo de corrente, limites de tensão e de fornecimento de energia assim como os limites dos valores de operação para a variável  $x$ .

$$|f| \leq \bar{f} \quad (4.7)$$

$$\underline{V} \leq V \leq \bar{V} \quad (4.8)$$

$$\underline{g} \leq g \leq \bar{g} \quad (4.9)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad (4.10)$$

Na Equação 4.7,  $\bar{f}$  representa o máximo valor permitido para o fluxo de corrente.

Na Equação 4.8,  $\underline{V}$  representa o mínimo valor permitido para a tensão e  $\bar{V}$  representa o máximo valor permitido para a tensão.

Na Equação 4.9,  $\underline{g}$  e  $\bar{g}$  representam o mínimo e o máximo valor permitido para fornecimento de energia.

A variável  $x_{ij}$  na Equação 4.10 é uma variável inteira que existe só quando o valor dela encontrado pelo algoritmo seja 1.

Finalmente a seguinte restrição foi utilizada para evitar a formação de malhas no sistema.

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} \leq N \quad (4.11)$$

$$N = \text{número máximo de nós} - \text{número de subestações} \quad (4.12)$$

Utilizar uma restrição de radialidade para evitar a formação de malhas é muito importante nos sistemas de distribuição. Uma rede de distribuição contendo muitos alimentadores radiais e subestações pode ser considerada como uma floresta, onde o número máximo dos ramos é igual ao número total de nós da rede excluindo nós de subestações. Para garantir que a rede obtida seja sempre radial, é necessário adicionar restrições com informações específicas sobre a topologia da rede que está sendo analisada.

Considerando a diversidade de situações encontradas, esta tarefa pode ser relativamente complexa. Uma estratégia simplificada foi utilizada neste trabalho, que consiste em limitar o

número de linhas construídas (ramos ativos) a ser menor ou igual ao número total de barras conectadas da rede, conforme a Equação 4.11.

## 4.4 Algoritmo Híbrido

O AHB apresentado neste trabalho foi implementado para resolver o problema utilizando duas estratégias que são executadas de forma sequencial.

A primeira estratégia estabelece uma solução inicial para o problema através de um AHC, conforme apresentado na seção 4.2. Esta solução inicial foi utilizada como dado de entrada para a segunda estratégia que resolve o problema por programação matemática, conforme apresentado na seção 4.3. O que se busca com isso é estabelecer a melhor solução para o problema através de um algoritmo que tenha um desempenho superior em termos de tempo de convergência quando comparado ao desempenho, nestes termos, dos algoritmos de programação matemática puros.

A Figura 4.4 ilustra o procedimento sequencial adotado pelo algoritmo para a busca da solução. Na figura são identificadas as duas estratégias usadas pelo algoritmo.

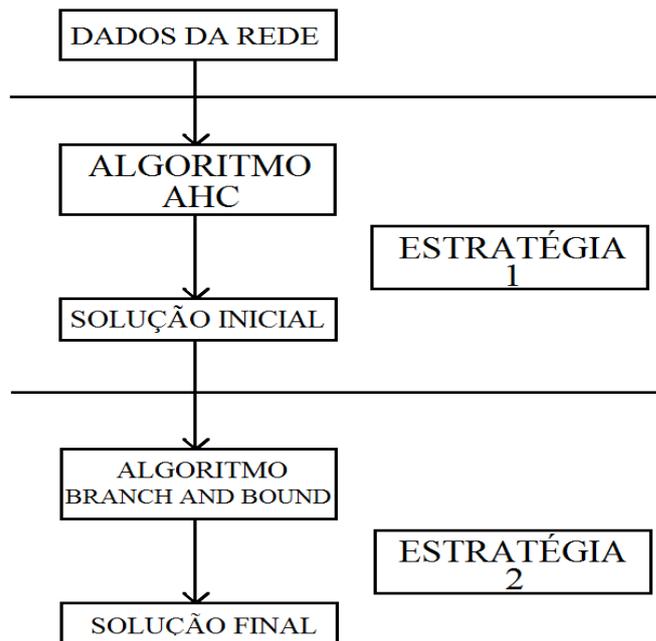


Figura 4.4 Estrutura do Algoritmo Híbrido

# Capítulo 5

## Testes e Resultados

### 5.1 Introdução

O AHB descrito no capítulo anterior foi implementado utilizando a versão do programa GAMS com o solver CPLEX. Para mostrar o desempenho computacional do algoritmo foram realizadas simulações com três sistemas testes da literatura.

A função objetivo do AHB foi minimizar os custos de construção de linhas dos sistemas de distribuição, considerando restrições de limites de tensão e limites de capacidade de corrente das linhas candidatas assim como as leis de corrente e de tensões e a configuração radial do sistema. Além disso, o AHB procura uma melhora nos tempos de convergência dos sistemas testados.

O primeiro teste foi realizado no sistema de 23 barras (Gomez et al., 2004; Lavorato, 2010; Rocha et al., 2012a; Mendonça, 2014), o segundo no sistema de 33 barras (Mendonça, 2014) e o terceiro, no sistema de 49 barras, que foi adaptado de Lavorato (2010).

Os sistemas testes utilizados possuem características diferentes. Nesse contexto, o sistema de 49 barras, além de possuir mais barramentos, possui mais opções de adição de circuitos por barramento, quando comparado com os outros, e por esse motivo o esforço computacional necessário para resolver este sistema é maior.

Os testes e resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de simulações, utilizando um Notebook PC Dell Intel Core i7 de 6GB RAM.

### 5.2 Sistema de 23 barras

Para o Sistema de 23 barras, inicialmente não há circuitos construídos, e existe a possibilidade para a construção de 35 circuitos. A Figura 5.1 ilustra todas as possíveis conexões entre as linhas candidatas do sistema e a posição da subestação do sistema.

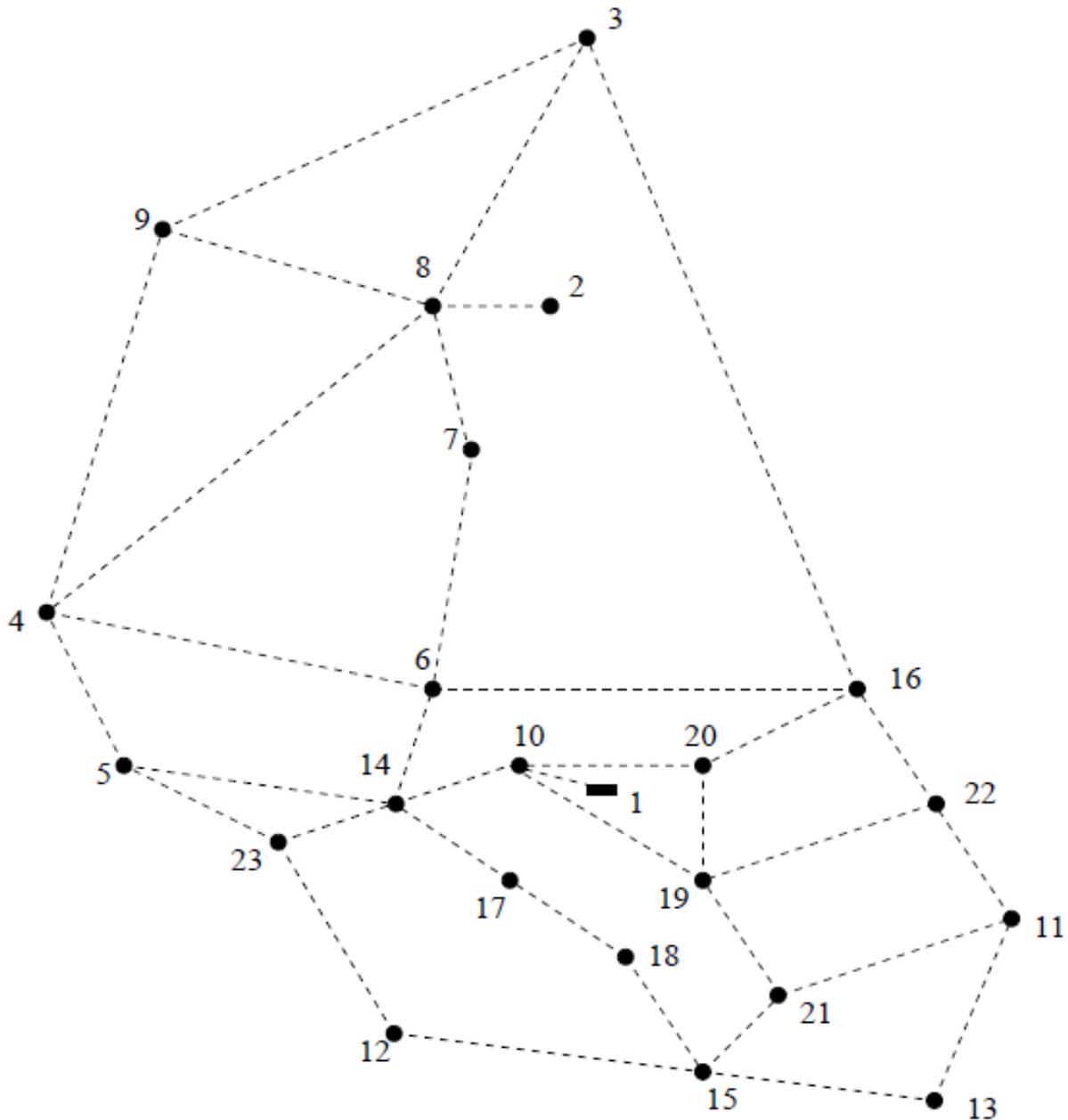


Figura 5.1: Sistema 23 Barras – Conexões de Linhas Candidatas  
Fonte: (Lavorato, 2010)

O sistema é alimentado com tensão de 34,5 kV, com a operação permitida entre 32,775kV e 36,225 kV (percentual de 5%).

Considerando a sua configuração, o sistema possui 22 barramentos com carga e uma subestação com capacidade de 10 MVA (barramento 1).

Existe a possibilidade de construção de dois tipos de linha: condutores de alumínio 1/0 e 4/0 com custos de construção (por quilômetro) de 10k US\$/km e 40k US\$/km, respectivamente.

Os dados para o sistema, apresentados a seguir foram adaptados de Rocha et al. (2012), Lavorato (2010) e Mendonça (2014).

A Tabela 5.1, Tabela 5.2 e Tabela 5.3 apresentam os dados de demanda nas barras, dos comprimentos das linhas e dos tipos de condutores.

Tabela 5.1 Dados de Demanda nas Barras

Barra	S <sub>D</sub> KVA	S <sup>0</sup> KVA	Barra	S <sub>D</sub> KVA	S <sup>0</sup> KVA
1	0,0	10000	13	320,0	-
2	36,0	-	14	320,0	-
3	640,0	-	15	320,0	-
4	320,0	-	16	320,0	-
5	320,0	-	17	320,0	-
6	320,0	-	18	320,0	-
7	320,0	-	19	320,0	-
8	320,0	-	20	320,0	-
9	320,0	-	21	320,0	-
10	320,0	-	22	320,0	-
11	320,0	-	23	320,0	-
12	320,0	-			

Tabela 5.2 Dados dos Comprimentos das Linhas

Barra De	Barra Para	Comprimento Km	Barra De	Barra Para	Comprimento Km
1	10	0,20209	10	20	0,69728
2	8	0,07560	11	13	0,50527
3	8	2,70790	11	21	0,63941
3	9	1,82020	11	22	0,69245
3	16	4,22370	12	15	0,98085
4	5	0,94020	12	23	0,67855
4	6	1,50170	13	15	0,62291
4	8	2,30530	14	17	0,44821
4	9	3,44790	14	23	0,48604
5	14	1,01620	15	18	0,57114
5	23	0,64091	15	21	0,60687
6	7	0,81807	16	20	0,50185
6	14	0,81772	16	22	0,94829
6	16	1,17520	17	18	0,44113
7	8	0,68661	19	20	0,73027
8	9	2,05670	19	21	0,55500
10	14	0,42971	19	22	0,58266
10	19	0,59489			

Tabela 5.3 Dados dos Tipos de Condutores

Tipo	Resistência $\Omega/\text{km}$	Reatância $\Omega/\text{km}$	Custo US\$/km	Capacidade A
1/0	0.6045	0.429	10000	230
4/0	0.3017	0.402	40000	340

Na Tabela 5.1 os símbolos  $S_D$  e  $S^0$  representam as potências de demanda e de fornecimento nas barras.

### 5.3 Resultados para o sistema de 23 barras

Para analisar os resultados do AHB para o sistema de 23 barras, inicialmente este sistema foi resolvido de forma separada, primeiro com auxílio de um algoritmo AHC e depois de um algoritmo B&B, com o objetivo de fazer comparações entre os tempos de convergência obtidos e dessa maneira mostrar a eficiência do AHB.

O AHC é o mesmo que foi utilizado em Mendonça (2014). Os resultados desse algoritmo foram os mesmos daqueles divulgados em Rocha et al. (2012a), com a diferença de que o desempenho computacional foi muito melhor. A justificativa para o melhor desempenho está relacionada com o tipo de metodologia utilizada para o cálculo do índice de sensibilidade (foi utilizado um método de varredura ao invés do método Newton Raphson).

Assim, o tempo gasto pelo AHC para determinar a configuração final deste sistema foi de 0,81 segundos, tempo que mostra um bom desempenho para o AHC.

O algoritmo B&B que utiliza PLIM precisou de um tempo de 8,14 segundos, tempo relativamente pequeno para um método que utiliza programação matemática, mas isto é por causa de que o sistema testado é pequeno e não tem muitas opções de construção de linhas.

Finalmente na parte final dos testes para o sistema de 23 barras foi utilizado o AHB e para resolver o problema, ele utilizou um tempo de 5,83 segundos.

O custo mínimo de construção de linhas para o AHB foi de 151727 US\$. O mesmo valor foi encontrado para o AHC e para o B&B nos primeiros passos respectivamente.

Pode-se apreciar que o AHB melhorou o tempo de convergência do algoritmo B&B e assim resulta eficiente utiliza-lo em sistemas pequenos.

A Figura 5.2 ilustra a configuração final encontrada para o sistema de 23 barras.

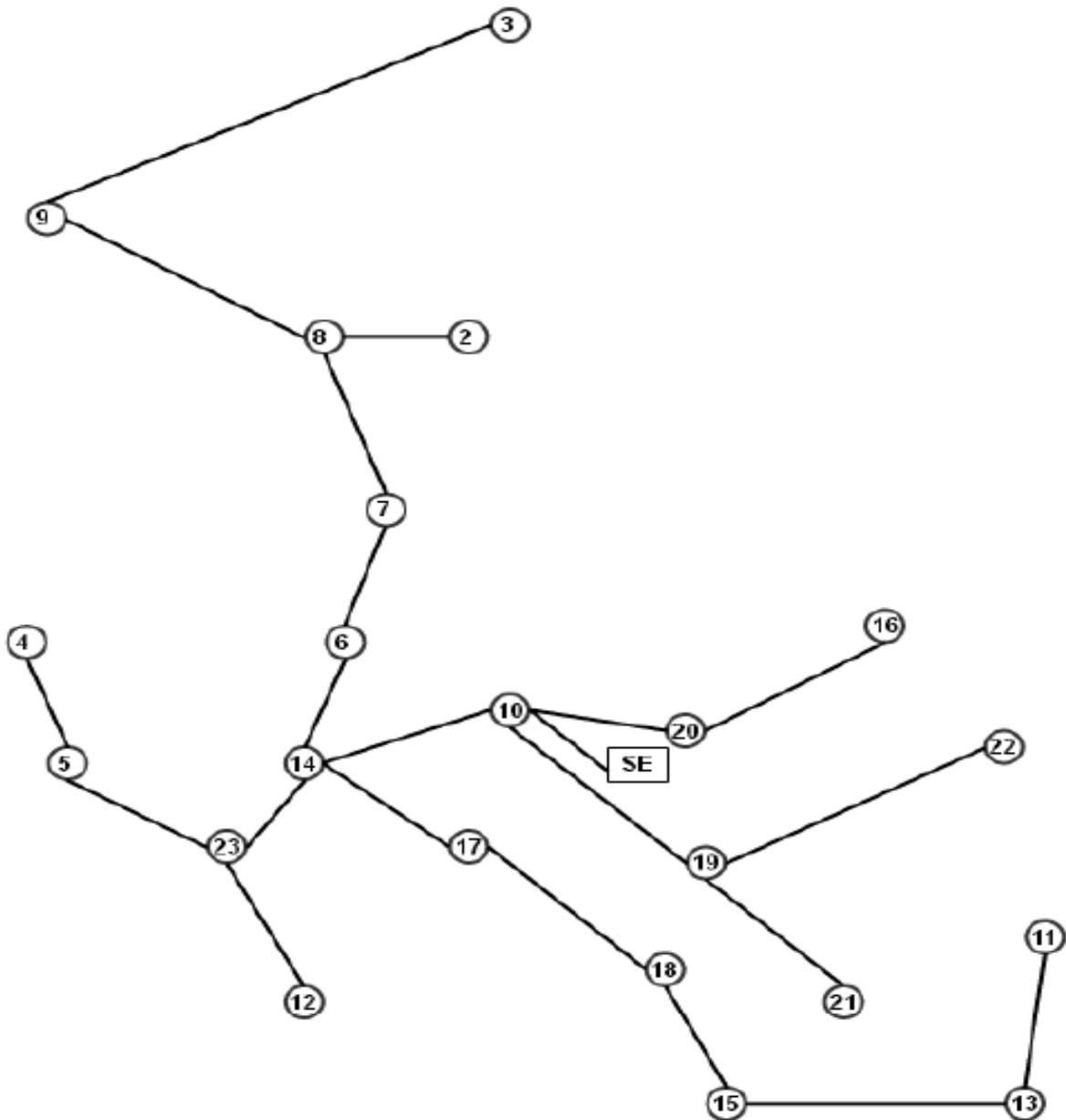


Figura 5.2 Configuração Final do Sistema de 23 Barras  
 Fonte: Mendonça (2014)

## 5.4 Sistema de 33 barras

O sistema de 33 barras (Mendonça, 2014), igual que o sistema anterior, não tem circuitos construídos, mas ele tem a possibilidade de construção de 37 circuitos e são usados também os mesmos tipos de linhas mostrados no sistema anterior (Tabela 5.2).

Também foi considerado que o sistema é alimentado com tensão de 34,5 kV, com a operação permitida entre 32775 kV e 36225 kV (percentual 5%).

O sistema possui 32 barramentos com carga não uniforme e uma subestação que fornece ao sistema com uma potência de 10 MVA (barramento 0). Com relação ao sistema teste anterior, existem menos opções de circuitos candidatos à adição por barramento.

A Figura 5.3 ilustra todas as possíveis conexões entre as linhas candidatas e a posição da subestação no sistema de 33 barras.

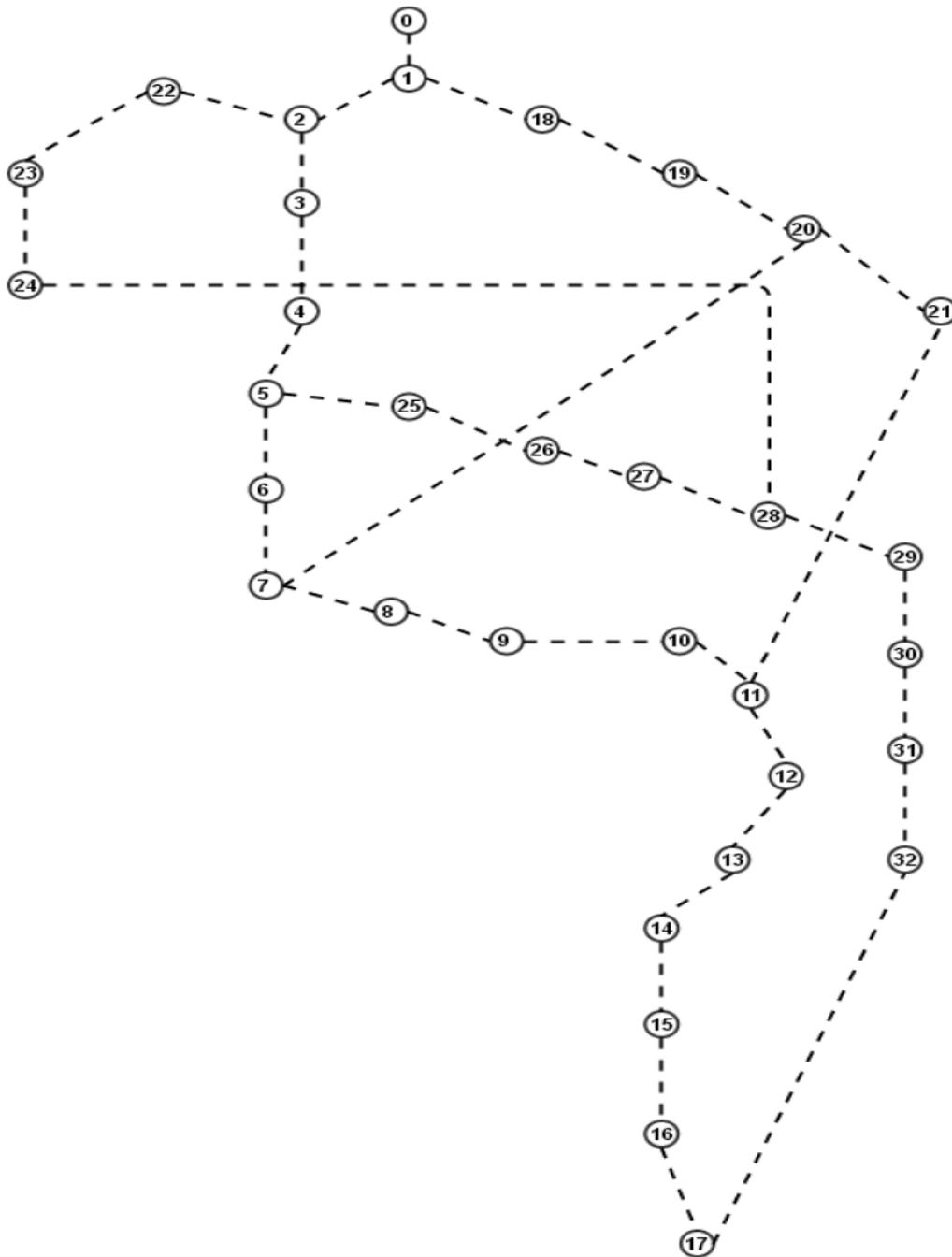


Figura 5.3: Sistema 33 Barras – Conexões de Linhas Candidatas  
Fonte: Mendonça (2014)

A Tabela 5.4 e a Tabela 5.5 apresentam os dados das demandas dos barramentos e os dados dos comprimentos das linhas respectivamente.

Na Tabela 5.4 os símbolos  $S_D$  e  $S^0$  representam as potências de demanda e de fornecimento (capacidade máxima), em kVA.

Tabela 5.4 Dados de Demanda nas Barras

Barra	$S_D$ KVA	$S^0$ KVA	Barra	$S_D$ KVA	$S^0$ KVA
0	0,000	10000	17	98,489	-
1	116,620	-	18	98,489	-
2	98,489	-	19	98,489	-
3	144,220	-	20	98,489	-
4	67,082	-	21	98,489	-
5	63,246	-	22	102,960	-
6	223,610	-	23	465,190	-
7	223,610	-	24	465,190	-
8	63,246	-	25	65,000	-
9	63,246	-	26	65,000	-
10	54,083	-	27	63,246	-
11	69,462	-	28	138,920	-
12	69,462	-	29	632,460	-
13	144,220	-	30	165,530	-
14	60,828	-	31	232,590	-
15	63,246	-	32	72,111	-
16	63,246	-			

Tabela 5.5 Dados dos Comprimentos das Linhas

Barra De	Barra Para	Comprimento Km	Barra De	Barra Para	Comprimento Km
0	1	0,1396	13	14	1,0673
1	2	0,7464	14	15	1,2467
1	18	0,3058	15	16	2,9008
2	3	0,5541	16	17	1,2549
2	22	0,7372	17	32	0,9539
3	4	0,5770	18	19	2,7315
4	5	1,4596	19	20	0,8495
5	6	0,8722	20	21	1,5834
5	25	0,3073	22	23	1,5436
6	7	1,0108	23	24	1,5348
7	8	1,7110	24	28	0,9539
7	20	3,8157	25	26	0,4302

Dados dos Comprimentos das Linhas (Continuação)

Barra De	Barra Para	Comprimento Km	Barra De	Barra Para	Comprimento Km
8	9	1,7263	26	27	1,9047
8	14	3,8157	27	28	1,4389
9	10	0,2793	28	29	0,7683
10	11	0,5320	29	30	1,8482
11	12	2,5199	30	31	0,6433
11	21	3,8157	31	32	0,8504
12	13	1,2078			

## 5.5 Resultados para o sistema de 33 barras

Para a análise dos resultados do AHB, foi utilizada a mesma metodologia que aquela adotada para o sistema anterior. O AHC é o mesmo que foi utilizado em Mendonça (2014), porém os resultados para o primeiro passo foram os mesmos.

Assim, o tempo gasto pelo AHC para determinar a configuração final deste sistema foi de 12,78 segundos, tempo que continua sendo pequeno para este tipo de sistema.

O algoritmo B&B para este sistema gastou um tempo de 0,98 segundos. Aqui o tempo resultou ser menor comparado com o sistema de 23 barras, devido a que neste caso o sistema testado possui menos opções de construção de linhas.

Finalmente o AHB para o sistema de 33 barras gastou um tempo de 13,51 segundos.

O custo mínimo de construção de linhas neste sistema para o AHB foi de 343851 US\$. O mesmo valor foi encontrado em Mendonça (2014) e também nos algoritmos AHC e B&B que fazem parte do AHB respectivamente.

Pode-se apreciar neste sistema de 33 barras que o tempo de convergência do AHB (considerando apenas o tempo de convergência para a estratégia 2) melhorou em relação ao tempo do algoritmo B&B, e ambos encontram também a solução ótima global do sistema.

A Figura 5.4 ilustra a configuração final encontrada para o sistema de 33 barras.

Com respeito aos resultados obtidos com os sistemas, pode-se dizer que o AHB mostra bom desempenho para sistemas pequenos. Na próxima seção é apresentada mais uma análise de resultados, para um sistema teste de 49 barras, que tem características mais complexas que os sistemas já mostrados (maior quantidade de opções para adição de linhas, maior quantidade de barras).

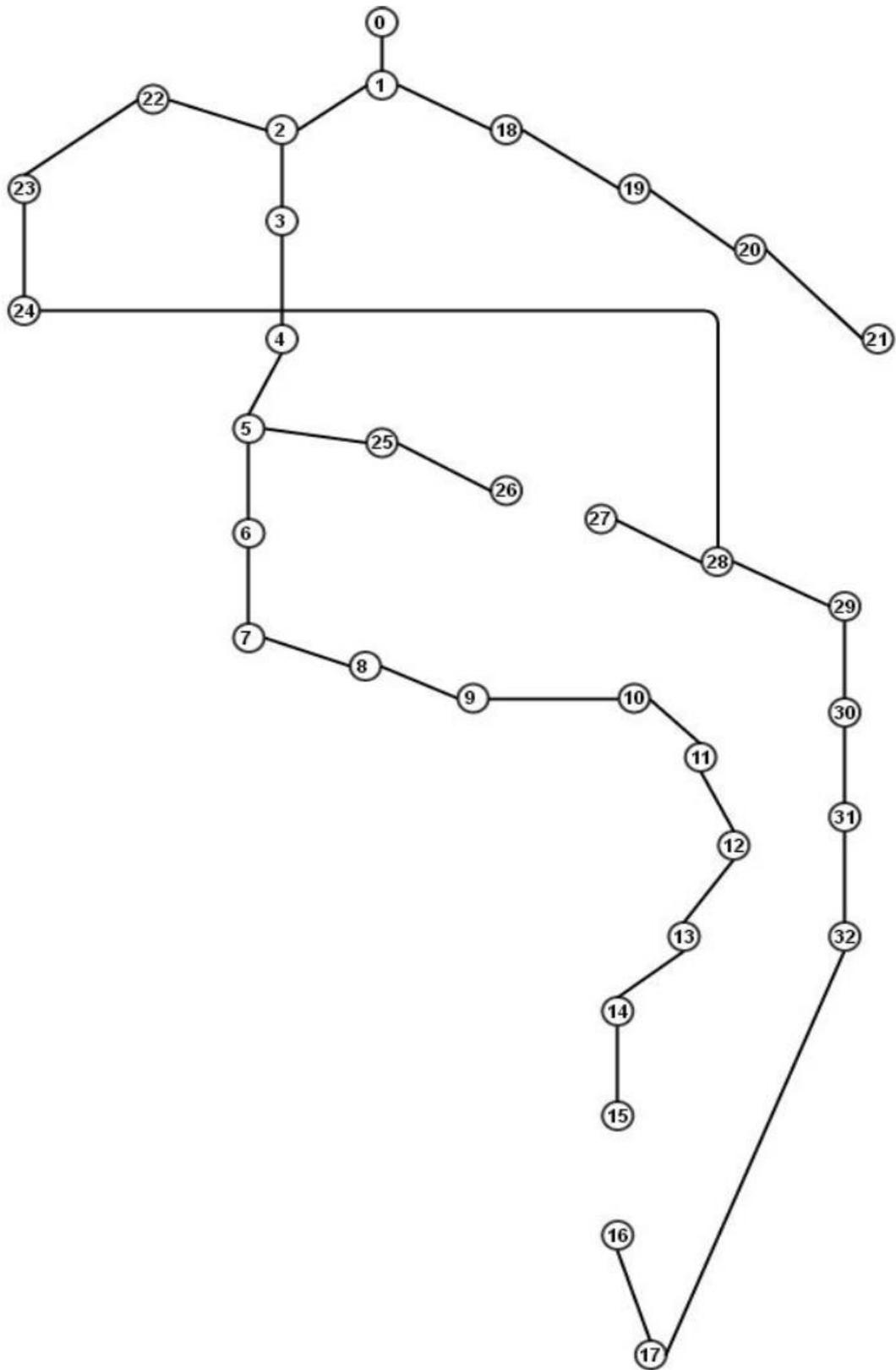


Figura 5.4 Configuração Final do Sistema de 33 Barras  
Fonte: Mendonça (2014)

## 5.6 Sistema de 49 barras

O seguinte sistema de 49 barras foi adaptado de (Lavorato, 2010). O sistema original possuía 136 barramentos, com duas subestações e 144 opções de construção de linhas.

Assim o sistema adaptado para este trabalho possui 49 barramentos com 76 opções de construção de linhas nas diferentes barras do sistema e não tem circuitos construídos.

Também foi considerado que o sistema é alimentado com tensão de 34,5 kV, com a operação permitida entre 32775 kV e 36225 kV (percentual 5%).

O sistema possui 48 barramentos com carga não uniforme, além de uma subestação que fornece ao sistema com uma potência de 25 MVA (barramento 1). Com relação ao sistema teste anterior existem mais opções de circuitos candidatos à adição por barramento.

A Figura 5.5 ilustra todas as possíveis conexões entre as linhas candidatas e a posição da subestação no sistema de 49 barras.

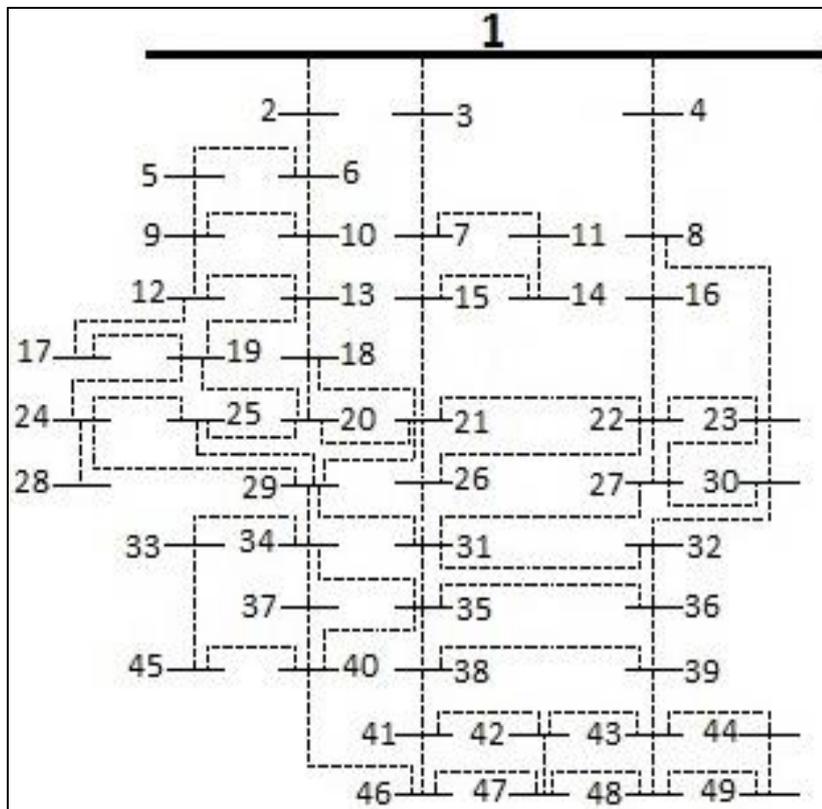


Figura 5.5: Sistema 49 Barras – Conexões de Linhas Candidatas

As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam os dados das demandas nas barras, características do tipo de condutor e os dados dos comprimentos das linhas.

Na Tabela 5.6 os símbolos  $S_D$  e  $S^0$  representam as potências de demanda e de fornecimento (capacidade máxima), em kVA.

Tabela 5.6 Dados de Demanda nas Barras

Barra	$S_D$ KVA	$S^0$ KVA	Barra	$S_D$ KVA	$S^0$ KVA
1	0,0000	25000	26	55,7429	-
2	1,5000	-	27	83,0344	-
3	1,5000	-	28	154,0363	-
4	1,5000	-	29	252,0390	-
5	93,6563	-	30	80,3755	-
6	335,0450	-	31	94,8322	-
7	160,2193	-	32	86,4655	-
8	256,8657	-	33	418,3810	-
9	67,0485	-	34	497,8233	-
10	134,0893	-	35	1235,2656	-
11	150,8472	-	36	97,6203	-
12	125,7155	-	37	269,0935	-
13	268,1983	-	38	264,8550	-
14	313,5349	-	39	94,8332	-
15	326,8763	-	40	303,9557	-
16	231,8113	-	41	153,4063	-
17	213,7290	-	42	326,3331	-
18	51,4225	-	43	104,3149	-
19	45,7949	-	44	154,7971	-
20	33,5347	-	45	108,8097	-
21	257,0954	-	46	436,9400	-
22	67,0717	-	47	78,1756	-
23	257,0954	-	48	5,4618	-
24	9,8459	-	49	25,0696	-
25	65,0314	-			

Tabela 5.7 Dados do Tipo de Condutor

Tipo	Resistência $\Omega/\text{km}$	Reatância $\Omega/\text{km}$	Custo US\$/km	Capacidade A
1	0.040680	0.030376	4000.00	230.00

Tabela 5.8 Dados dos Comprimentos das Linhas

Barra De	Barra Para	Comprimento Km	Barra De	Barra Para	Comprimento Km
1	2	0,7522	23	30	1,0101
1	3	0,7522	24	25	0,7501
1	4	0,7522	24	28	0,4954
2	6	0,4954	24	29	0,8901
3	7	0,7522	25	29	0,4954
4	8	0,7522	26	31	1,0101
5	6	0,7501	27	30	0,7501
5	9	0,4954	27	31	1,2532
6	10	0,4954	29	31	1,2532
7	15	0,4954	29	34	1,1533
7	11	0,4954	30	32	0,4954
8	16	0,4954	31	32	1,2455
8	23	1,6125	31	35	0,4954
9	10	0,7501	32	36	0,4954
9	12	0,4954	33	34	0,7501
10	13	0,4954	33	45	1,6648
11	14	0,4954	34	35	1,2582
12	13	0,7501	34	37	0,4954
12	17	0,4954	35	36	1,2455
13	18	0,4954	35	38	0,4954
13	19	1,2689	35	40	1,6125
14	15	0,4954	36	39	0,4954
15	21	1,0101	37	40	0,4954
16	22	1,0101	38	39	1,2455
17	19	0,4954	38	41	0,4954
18	20	0,4954	39	43	0,4954
18	21	1,2689	40	45	0,4954
19	20	0,7501	40	46	1,2582
19	24	0,4954	41	42	0,7501
20	21	1,1533	41	46	0,7501
20	25	0,4954	42	43	0,4954
21	22	0,7501	42	47	0,4954
21	26	0,4954	43	44	0,4954
21	29	1,5866	43	48	0,4954
22	23	0,4954	44	49	0,4954
22	26	0,8901	46	47	0,7922
22	27	0,4954	47	48	0,4954
23	27	0,7501	48	49	0,4954

## 5.7 Resultados para o sistema de 49 barras

Para a análise dos resultados do AHB, foi utilizada a mesma metodologia que aquela adotada para o sistema anterior. Considerando os resultados obtidos com o AHC, o tempo gasto para determinar a configuração final deste sistema foi de 37,14 segundos. O algoritmo B&B para este sistema gastou um tempo de 16459 segundos. O tempo resultou ser muito maior comparado aos sistemas anteriores, devido ao sistema testado possuir mais opções de construção de linhas e também mais barramentos.

Finalmente o AHB para o sistema de 49 barras precisou de um tempo de 9715 segundos para encontrar a solução.

A Figura 5.6 ilustra a configuração final encontrada para o sistema de 49 barras.

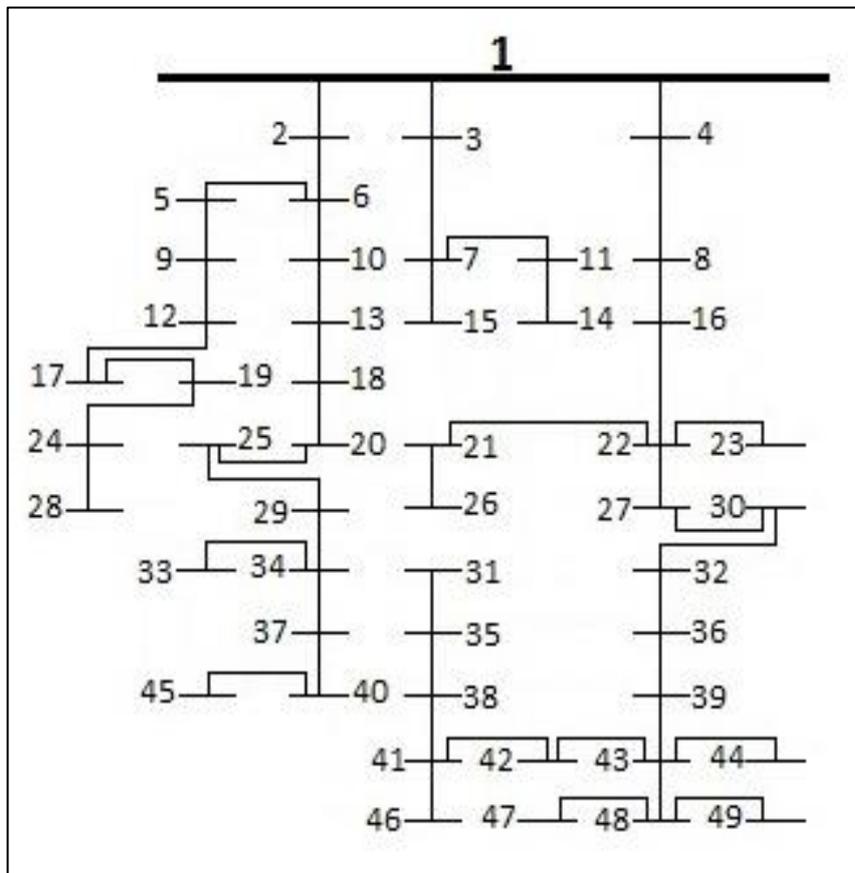


Figura 5.6 Configuração Final do Sistema de 49 Barras

O custo mínimo de construção de linhas para este sistema, de acordo com o AHB, foi de 111056 US\$. O mesmo valor foi encontrado pelos algoritmos AHC e B&B. Esse valor representa a melhor solução encontrada para o sistema.

Pode-se apreciar neste sistema de 49 barras que o tempo de convergência do AHB melhorou muito mais comparado com o tempo do algoritmo B&B (o tempo do AHB foi quase a metade que o tempo do B&B), isso significa que o desempenho do AHB em termos de tempo de convergência comparado com o tempo do algoritmo B&B é muito mais eficiente quando o sistema é cada vez mais complexo.

Assim, o AHB pode ser utilizado para melhorar os tempos de convergência dos algoritmos de programação matemática aplicados para resolver sistemas de grande porte.

## 5.8 Considerações Finais do Capítulo

A proposta deste capítulo foi apresentar os testes e os resultados obtidos através das simulações realizadas com o AHC, Algoritmo de programação matemática do tipo B&B e finalmente o Algoritmo Híbrido.

Foram apresentados três sistemas testes, com características diferentes, para avaliar o desempenho do algoritmo.

Os sistemas testes empregados foram: o Sistema de 23 barras, o Sistema de 33 barras, e uma adaptação de um Sistema de 49 barras. Desses três sistemas, o sistema de 49 barras tem mais opções de construção de circuitos nas barras.

A Tabela 5.9 mostra os resultados dos tempos de convergência para os três sistemas.

Tabela 5.9 Tempos de Convergência para os Sistemas Testes

	Tempo (s) Para AHC	Tempo (s) Para B&B	Tempo (s) Para AHB
Sistema de 23 Barras	0,81	8,14	5,83
Sistema de 33 Barras	12,78	0,98	13,51
Sistema de 49 Barras	37,14	16459	9715

Os resultados da Tabela 5.9 mostram que os tempos de convergência do AHC para os três sistemas são relativamente pequenos, assim esse AHC como primeiro passo do AHB ajuda a melhorar o tempo final de convergência do AHB.

Para o sistema de 33 barras o tempo de convergência do algoritmo de programação matemática do tipo B&B foi melhor quando comparado com o AHB, mas nos sistemas de 23 e 49 barras os tempos de convergência do AHB foram melhores comparados com este, e melhor ainda no sistema de 49 barras, onde o tempo de convergência do AHB foi quase a

metade que o tempo deste. Dessa maneira pode-se concluir que o AHB é cada vez mais eficiente quanto mais complexo for o sistema teste.

Finalmente, foi apresentado também que as configurações finais dos três sistemas eram de tipo radial, isso foi devido à restrição de radialidade que utilizou o algoritmo de programação matemática do tipo B&B e que foi mostrado no capítulo 4.

# Capítulo 6

## Conclusões

Este trabalho apresentou um algoritmo híbrido baseado na utilização de duas técnicas de características diferentes. A primeira utiliza um método iterativo (AHC) para encontrar uma solução inicial e seguidamente um método matemático (algoritmo B&B) que encontra uma solução final. Os resultados mostraram uma melhora do tempo de convergência, quando comparado ao tempo do algoritmo de programação matemática com a qualidade de obter a solução ótima global do sistema.

O AHC e o algoritmo B&B foram utilizados separadamente inicialmente e depois foi considerado a sua aplicação em conjunto, com o auxílio da linguagem de programação GAMS. Isto foi realizado para auxiliar nas análises e comparações entre os resultados, contribuindo para estabelecer as vantagens de se utilizar o algoritmo híbrido.

Foram utilizados para este trabalho três sistemas testes com características diferentes. O primeiro foi um sistema de 23 barras com 35 opções de construção de linhas. Os resultados mostraram um bom desempenho do algoritmo híbrido (5.83 seg.) melhorando o tempo de convergência obtido antes, através do algoritmo de B&B (8.14 seg.). A solução ótima global foi encontrada pelos três algoritmos.

No sistema de 33 barras, ao contrário do sistema anterior, os resultados mostraram que o algoritmo B&B obteve um melhor tempo de convergência (1 seg.) em relação ao AHC (12.78 seg.) e ao AHB (13.51 seg.). Com esses resultados pode-se concluir que o AHC demora mais tempo de convergência quando o sistema possui cada vez mais barramentos, ao contrário do algoritmo B&B, que foi mais rápido devido a que o sistema de 33 barras tinha somente 37 opções de construção de linhas, ou seja, quase a mesma quantidade entre barras e linhas candidatas à adição, assim o algoritmo B&B não precisou de muito esforço computacional para obter a solução ótima. Finalmente o AHB (13.51 seg.) não conseguiu melhorar o tempo do algoritmo B&B devido a que este algoritmo precisava de uma solução inicial proporcionada pelo AHC que fosse mais rápida que a solução do algoritmo B&B, situação que não aconteceu neste sistema. Assim o melhor tempo de convergência foi do algoritmo B&B.

No sistema de 49 barras, que possui 76 opções de construção de linhas, os resultados foram os esperados. Os três algoritmos encontram a solução ótima do sistema. Os tempos de convergência, primeiro para o AHC, foi de 37.14 seg. (aumentou em relação aos sistemas anteriores por ser um sistema com maior número de barras).

Para o algoritmo B&B o tempo de execução foi de 16459 seg. (devido a que a combinação de linhas aumentou em relação aos sistemas anteriores). Para o AHB o tempo de execução foi de 9715 seg. melhorando assim o tempo de convergência do algoritmo B&B, devido à solução inicial do AHC.

Pode-se concluir de forma geral que, para o AHC, o tempo de convergência aumentará quando o número de barras dos sistemas testados aumentarem também.

Para o algoritmo B&B o tempo aumentará se as combinações lineares (opções de adição linha) do sistema também aumentarem.

O AHB é mais eficiente que o algoritmo B&B em termos de tempo de convergência quando o AHC encontra uma solução inicial mais rápida que a solução encontrada no algoritmo de B&B, mas isso acontecerá se o sistema teste tiver varias opções de construção de linhas entre os barramentos.

Considerando esse critério, uma sugestão para aplicação do AHB seria utiliza-lo para resolver sistemas de grande porte que contenham muitas combinações como opções de construção de linha. Uma sugestão para a continuidade da pesquisa seria adaptar o AHB para considerar sistemas com múltiplas subestações, muito mais complexos de serem resolvidos.

# Referências Bibliográficas

- Almeida, F., Blesa Aguilera, M.J., Blum, C., Moreno Vega, J.M., Pérez, M., Roli, A., Sampels, M. (eds) (2006). *Proceedings of HM 2006 – Third International Workshop on Hybrid Metaheuristics, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Germany.
- Asada, E.N., Carreño, E., Romero, R. & García, A.V. (2005). A Branch-and-Bound Algorithm for the Multi-Stage Transmission Expansion Planning, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, EUA, pp. 1-6.
- Barreto, L. S. (2007). *Modelo de Otimização para o Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição considerando Geração Distribuída*, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Bartz-Beielstein, T., Blesa Aguilera, M. J., Blum, C., Naujoks, B., Roli, A., Rudolph, G., Sampels, M. (eds) (2007). *Proceedings of HM 2007 – Fourth International Workshop on Hybrid Metaheuristics, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Germany.
- Blesa Aguilera, M. J., Blum, C., Roli, A., Sampels, M. (eds) (2005). *Proceedings of HM 2005 – Second International Workshop on Hybrid Metaheuristics, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Germany.
- Brandt, M.H.M. (2016) *Algoritmo Heurístico Especializado aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Brooke, A., Kendrick, D.A. and Meeraus A. (1997). *GAMS: Sistema Geral de Modelagem Algébrica*, Blucher, Brasil.
- Cossi, A.M. (2008). *Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- De Camargo, V.L.V. (2014). *Algoritmo Genético Especializado aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- De Pádua, S. G.B. (2014). *Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica de Média Tensão através de um Algoritmo de Busca Dispersa*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- Dumitrescu, I. & Stützle, T. (eds) (2003), *Combinations of Local Search and Exact Algorithms: Applications of Evolutionary Computation, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, pp. 211-223.
- Glover, D & Sarma, M.S. (2008). *Power System Analysis and Design*, Thomson, EUA.
- Escobar, A.H., Gallego R.A.R. & Romero, R. Using traditional heuristic algorithms on an initial genetic algorithm population applied to the transmission expansion planning problem, *Ingeniería e Investigación* **31**(1): 127-143.
- Garver, L. (1970). Transmission Network Estimation Using Linear Programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-89**(7): 1688-1697.
- Gendreau, M. & Potvin, J.Y. (2010). *Handbook of Metaheuristics*, Springer, Canadá.

- Gomez, J.F., Khodr, H.M., Oliveira, P.M., Ocque, L., Yusta, J.M., Villasana, R. & Urdaneta, A.J. (2004). Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(2): 996-1004.
- Haffner, S., Monticelli, A., Garcia A.V. & Romero, R. (2001). Specialised branch-and-bound algorithm for transmission network expansion planning, *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* **148**(5): 482-488.
- Haffner, S., Pereira, L.A., Pereira, L.F.A., Lemos, F.A.B., De Lima, A.L., Brixius, C.A. & Giron, L.R. (2004). Optimization Model for Expansion Planning of Distribution Systems, *IEEE Transmission and Distribution Conference: Latin America*, São Paulo, Brasil, pp. 457-463.
- Henderson, M. I. (2014). When The Lights Go Out: Getting Power Systems Running Again [Guest Editorial], *IEEE Power and Energy Magazine* **12**(1): 18-23.
- Khator, S.K. & Leung, L.C. (1997). Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(3): 1151-1159.
- Knight, U.G.W. (1960). The Logical Design of Electric Networks Using Linear Programming Methods, *Proceeding of the IEE - Part A: Power Engineering* **107**(33): 306-314.
- Land, A. & Doig, A. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*.
- Lavorato, M. (2010). *Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Marcolin, N. (2005). Rotas da Eletricidade. *Pesquisa FAPESP* (118). Acesso em março/16. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2005/12/08-09-memoria.pdf>
- Mendonça, W.D.F.(2014). *Algoritmo Especializado aplicado ao Planejamento da Expansão de Redes Aéreas de Sistemas de Distribuição*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Monticelli, A., Santos, A., Pereira, M.F., Cunha, S., Parker, B. and Praça, J.G. (1982), Interactive Transmission Network Planning Using a Lest-Effort Criterion, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-101**(10): 3919-3925.
- Moreira, L. (2012). Ribeirão do Inferno: A Primeira Hidrelétrica Do Brasil. Acesso em março/16. Disponível em: <http://www.revistaoempreiteiro.com.br/Publicacoes/5749/ribeiraodoinfernoaprimeirahidreletricadobrasil.aspx>
- Pereira, M. & Pinto, L. (1985). Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems* **PAS-104**(2): 381-389.
- Rider, M. J. (2006). *Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando os Modelos CC - CA e Técnicas de Programação Não Linear*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Rider, M. J., Garcia A.V. & Romero, R. (2008) Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm, *IET Generation, Transmission & Distribution* **2**(1): 90-99.

- Rocha, C., Contreras, J., Lotero, R.C. & Muñoz, J.I. (2012). Algoritmo Heurístico Construtivo Enumerativo Aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, *XIX Congresso Brasileiro de Automática*, Campina Grande, Brasil, pp. 2156-2163.
- Rocha, C., Contreras, J., Lotero, R.C. & Muñoz, J.I. (2012). Um Modelo Híbrido Linear aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Goiania, Brasil, pp. 1-6.
- Romero, R., Rocha, C., Mantovani, M. & Mantovani, J.R.S. (2003). Analysis of heuristic algorithm for the transportation model in static and multistage planning in network expansion systems, *IEE Proceedings - Generation, Transmission & Distribution* **150**(5): 521-526.
- Romero, R. & Rocha, C. (2005). Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model In Network Transmission Expansion Planning, *IEE Proceeding Generation, Transmission & Distribution* **152**(2): 277-282.
- Romero, R., Asada, E. N., Carreño, E. & Rocha, C. (2007). Constructive heuristic algorithm in branch-and-bound structure applied to transmission network expansion planning, *Sba Controle & Automação* **18**(1): 318–323.
- Sampaio, M.E.C. (2008). O Que É Planejamento? Acesso em: Janeiro/16, Disponível em: <http://www.administradores.com.br/artigos/negocios/o-que-e-planejamento/39381/>
- Silva, L.L.F. (2006). *Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Sousa, A.S., Rabêlo, R.A.L. & Asada, E.N. (2009). Aplicação do algoritmo Branch and Bound para solução do problema de Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, *XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Porto Seguro, Brasil, pp. 13-24.
- Tagliailenha, S.L.S. (2008). *Novas Aplicações de Metaheurísticas na Solução do Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- Willis, H.L. (2004). *Power Distribution Reference Book*, Mark Dekke, EUA.